



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

지리학석사학위논문

해빈 미지형에
지하수 유출이 미치는 영향
- 학ampo 해수욕장을 사례로 -

2016년 8월

서울대학교 대학원
지리학과
배진수

해빈 미지형에 지하수 유출이 미치는 영향

- 학ampo 해수욕장을 사례로 -

지도교수 유 근 배

이 논문을 지리학석사 학위논문으로 제출함

2016년 4월

서울대학교 대학원

지 리 학 과

배 진 수

배진수의 지리학석사 학위논문을 인준함

2016년 6월

위 원 장 _____ (인)

부 위 원 장 _____ (인)

위 원 _____ (인)

| 국 문 초 록 |

최근 점차 심각해지는 해빈의 침식 문제로 해빈 지형에 관한 관심이 증가하고 있다. 따라서 해빈 지형변화를 유발하는 많은 요인들에 대한 연구가 다양하게 이루어져 왔으나, 파랑이나 조석 등의 요인에 비해 지하수 유출이라는 요인은 지금까지의 연구들에서 상대적으로 주요하게 다루어 지지는 않았다.

이 연구의 목적은 경사급변점이 형성되고 이 지점에서 지하수의 유출이 나타나는 해빈에서 해빈의 단기적인 미지형 변화를 관찰하고 지하수의 유출량을 측정, 추정하여 해빈의 미지형변화에 지하수의 유출이 어떠한 영향을 미쳤는지를 파악하고자 하는 것이다. 이를 위해 설정한 연구의 세부 목적은 다음과 같다. 첫째, 지하수위를 측정하고 이에 영향을 미친 요인과의 관계를 밝힌 후 지하수의 유출량을 추정한다. 둘째, 지하수위의 측정기간 동안 발생한 해빈의 미지형 변화를 측량한다. 이를 위해서 충청남도 태안군 원북면 방갈리에 위치한 학암포 해수욕장의 북측 해빈을 대상으로 현장 연구를 진행하였다. 해빈 미지형 변화는 지상 LiDAR 측량을 이용하였으며, 사리와 조금을 기준으로 지하수 유출량이 최대값과 최소값을 보일 것으로 예상되는 기간을 선정하여 비교하였다. 한편, 파랑과 조석, 강수, 바람 등 해빈 지형변화에 영향을 미치는 다양한 요인들을 통제할 수 있도록 연구를 설계하였다.

연구 결과는 다음과 같다.

첫째, 지하수위와 유출량이 조석 주기에 따라 변동하는 것을 확인하였다. 지하수위의 변동은 내륙 방향으로 갈수록 시간이 더욱 지체되어 나타났다으며, 조석의 변동이 클수록 지하수위와 유출량의 변화율이 비례하여 증가하였다. 또한 지하수위와 유출량의 변동이 증가할 때는 급격하게 증가하는 반면 감소할 때는 완만하게 감소한다는 것을 확인하였다.

둘째, 측량 시기 동안 연구지역의 단면, 부피 및 층후의 변화를 확인하였다. 사리에는 전반적으로 침식되는 경향이 나타났으며, 유출지점 기준으로 상부와 하부의 기울기가 급해지는 모습을 보였다. 또한 유출지점 상

부의 변화량이 하부보다 많았다. 반면 조금에는 전반적으로 유의미한 변화가 나타나지는 않았으나 전반적으로 유출지점 하부와 전체 기울기가 급해졌다. 특히 간조 시점을 중심으로 지형변화의 경향성이 전환된다는 것을 확인하였다. 이는 사리에 누적 유출량이 더 많이 발생했으며, 유출량이 간조 시점에 최대값을 보였기 때문이라고 판단된다.

셋째, 지하수 유출이라는 요인이 해빈의 침식에 탁월한 영향을 미쳤음을 확인하였다. 또한 지하수 유출이 연구지역에 형성된 경사급변점을 유지, 강화시키는 하나의 요인이 될 수 있다는 가능성을 확인하였다. 이에 따라 경사급변점의 상부와 하부에 나타난 지형변화는 다른 경향을 보이며, 지하수 유출이라는 요인이 이러한 변화의 경향성을 강화시킨다고 판단하였다. 이를 바탕으로 지하수 유출이라는 매커니즘이 해빈의 유형 분류나 해빈 지형의 형성에 중요한 역할을 수행할 수 있을 것으로 생각된다.

주요어 : 지하수, 유출, 해빈, 미지형

학 번 : 2014-20249

| 목 차 |

I. 서론	1
1. 연구배경	1
2. 연구의 목적	5
II. 연구지역과 연구방법	6
1. 연구지역	6
2. 연구방법	11
1) 연구자료의 수집	11
2) 연구자료의 분석	20
III. 지하수 유출량의 변동과 해빈 미지형변화	24
1. 연구지역의 지형	24
1) 해빈의 유형	24
2) 입도 분포	25
2. 지하수위와 유출량의 변동 특성	27
1) 지하수위와 유출량 변동성의 주기	27
2) 지하수위와 유출량 변동성의 시간 지체	33
3. 연구지역의 지형변화	36
1) 단면 변화	36
2) 부피와 층후 변화	41
IV. 지하수 유출과 해빈 미지형변화의 관계	45
1. 부피와 층후 변화	45
2. 기울기 변화	50

3. 지형변화의 경향성	53
1) 연구지역의 평형 단면 경사	53
V. 결론	55
참고문헌	57

| 표 차례 |

표 1. 측량 및 지하수위 측정일자 파랑자료	9
표 2. 지하수위 측정 일시 및 특이사항	15
표 3. Leica ScanStation P16 제원	19
표 4. 지상 LiDAR 측량 일시 및 특이사항	20
표 5. 연구 지역의 무차원 침강속도와 상대조차	24
표 6. 경사도와 입도 분석 결과	26
표 7. 조위 변동 자료에 대한 FFT 분석 결과	27
표 8. 관정 위치별 지하수위 자료의 기술적 통계	27
표 9. 연구지역 강수 일시 및 일 강수량(mm)	32
표 10. 지상 LiDAR 측량 자료 중 분석 대상 자료	37
표 11. 2015년 8월 29일 단면 변화	37
표 12. 2015년 9월 19일 단면 변화	38
표 13. 8월 29일 부피 및 층후 변화량	42
표 14. 9월 19일 부피 및 층후 변화량	42
표 11. 2015년 8월 29일 단면 변화	50
표 12. 2015년 9월 19일 단면 변화	50
표 13. 평형 단면 경사 및 실측 경사	53

| 그림 차례 |

그림 1. 연구의 흐름도	5
그림 2. 연구 지역도	6
그림 3. 연구 지역 (지하수 유출 지점)	7
그림 4. 월별 기온과 강수량	8
그림 5. 월별 평균 풍속	9
그림 6. 월별 유의 파고와 파주기	10
그림 7. 축선 단면도	14
그림 8. 관정의 구조	15
그림 9. 투수계의 구조	18
그림 10. 상대조차와 무차원 침강속도에 따른 해빈 유형 분류	25
그림 11. 지하수위 및 유출량 변동 (2015.08.29.-30.)	28
그림 12. 지하수위 및 유출량 변동 (2015.09.05.-06.)	29
그림 13. 지하수위 및 유출량 변동 (2015.09.19.- 20.)	30
그림 14. 교차상관분석 (2015.08.29.)	34
그림 15. 교차상관분석 (2015.08.30.)	34
그림 16. 교차상관분석 (2015.09.05.-06.)	35
그림 17. 교차상관분석 (2015.09.19.-20.)	35
그림 18. 연구지역 LiDAR 기반 2차원 DEM (2015.9.19. 15시 측량) ..	36
그림 19. 연구지역 LiDAR 기반 3차원 DEM (2015.9.19. 15시 측량) ..	36
그림 20. 연구 지역 단면도 (2015.08.29.)	39
그림 21. 연구 지역 단면도 (2015.09.19.)	40
그림 22. 격자 내 부피 변화량 (2015.08.29.)	43
그림 23. 격자 내 부피 변화량 (2015.09.19.)	44
그림 24. 부피 및 유출량 변화 (2015.08.29.)	46
그림 25. 부피 및 유출량 변화 (2015.09.19.)	46
그림 26. 갯골 및 유출지점 주변 부피 변화량 (2015.08.29.)	48
그림 27. 갯골 및 유출지점 주변 부피 변화량 (2015.09.19.)	48

| 식 차례 |

식 2-1	11
식 2-2	12
식 2-3	12
식 2-4	13
식 2-5	13
식 2-6	16
식 2-7	16
식 2-8	17
식 2-9	17
식 2-10	21
식 2-11	21
식 2-12	22
식 2-13	22

I. 서론

1. 연구배경

지난 인류의 역사를 살펴보면 해안 지역은 인류 문명의 근간으로서 중요한 기능을 수행하여 왔다. 해안 지역은 인간과 자연에게 다양한 생태계 서비스를 비롯하여 각종 경제적 이익, 교통의 편의를 제공하였다(Yang et al., 2012). 이로 인해 많은 도시들이 해안에 입지하였고, 현재에도 세계 인구의 약 23%가 해안에서 100km 이내에 거주하고 있다(Goldberg, 1994; Small and Nicholls, 2003; 화이트 등, 2012). 뿐만 아니라 해안 지역은 해양과 육지의 경계로서 특수한 프로세스가 작용하는 곳이며, 바람, 조수, 파랑, 태풍 등 에너지의 유입이 가변적이고 퇴적물의 공급이 활발하여 환경 및 지형의 변화가 매우 역동적으로 일어나는 지역이기도 하다(Haslett, 2009; 화이트 등, 2012).

하지만 최근 개발로 인한 인위적인 해안 침식이나, 지구온난화로 인한 해수면의 상승에 따른 사빈의 후퇴 등의 해안 환경 파괴가 점차 심각해지고 있다(Brown and McLachlan, 2002). 우리나라의 경우 해수면이 지난 100년 동안 연간 약 1.9mm 상승하였는데, 이는 세계 평균보다 약 0.1mm 높다(박정재, 2009). 이로 인해 해변의 면적이 감소하고 있으며, 인위적인 구조물로 인한 해안 침식이 가속화되고 있다. 해안 지역의 인구밀도는 세계 평균에 비하여 약 세 배에 이르기 때문에(Small and Nicholls, 2003), 해안 지역의 이러한 극심한 환경 변화나 재해는 인류 문명에 상당히 큰 영향을 미칠 수 있다. 따라서 해안 환경과 그 역동성을 이해해야 할 필요성이 높아지고 있으며, 해안 지형 변화와 관련된 연구 또한 그 자체로서 뿐만 아니라 사회, 경제 등 종합적인 의미에서 의의를 가진다.

해양과 육지와 대기가 만나는 경계인 해안에서 가장 대표적인 지형 중 하나는 해변(beach)이다. 해변은 파랑이 퇴적물을 해안까지 운반한 후 해안에 퇴적물이 퇴적되어 형성된 지형이다. 해변에서는 형성된 지역의 특징이나 프로세스의 차이에 따라 퇴적물의 종류나 퇴적물 수치

및 유입 에너지 등이 달라진다. 따라서 해빈은 매우 다양한 유형이 존재하며 지형 변화가 역동적으로 일어나는 공간이다(Haslett, 2009).

때문에 해빈의 지형, 단면 변화, 퇴적물의 종류나 이동성에 관한 연구들이 많이 이루어져 왔으며, 특히 우리나라 서해안과 같은 대조차의 해빈 환경에서 나타나는 여러 차별성도 주요 연구주제로 다루어져 왔다. 그 중에서도 해빈 퇴적물에서 관찰할 수 있는 물리적/화학적 특성이나 퇴적환경과의 관계 등 퇴적학적 연구나(장진호 등, 1999; 이원영·성효현, 2013) 해빈의 계절적인 퇴적 특성과 지형 단면의 변화 및 침식/퇴적의 시계열적 변화 등에 관한 연구(윤용안, 2003; 소광석 등, 2009; 김찬웅 등, 2015)가 특히 많이 이루어져 왔다.

하지만 전술한 국내의 많은 해빈 관련 연구들은 지형 변화 프로세스의 역동성이 강한 겨울철에 주로 연구가 집중되어 여름철 해빈의 지형 변화에 대한 이해는 상대적으로 부족한 실정이다. 이는 해빈의 배후에 위치한 사구와 연결되어, 강한 바람으로 인해 해빈/사구 지형 변화의 역동성이 큰 겨울철에 많은 연구들이 집중하게 된 이유가 크다(류호상, 2010). 또한 대부분의 연구들이 해빈 전체를 다루거나 시기적으로 계절간의 변화를 다루는 등 거시적인 규모의 연구가 많다(윤용안, 2003). 따라서 보다 짧은 시기에 일어나는 미시적인 규모의 해빈 지형 변화를 다룬 연구들은 상대적으로 부족하다. 해빈의 단면은 파랑의 유형과 퇴적물 특성, 해빈 경사, 조차 등 다양한 요인의 복잡한 상호작용의 결과로서 에너지 유입량의 변화에 상당히 빠르게 반응한다는 사실을 고려한다면(화이트 등, 2012), 이처럼 해빈 전체의 장기적인 지형 변화만을 살펴볼 경우, 해빈 지형의 세밀한 변화에 대한 이해가 부족하여 지형 변화에 대한 전반적인 이해가 부족해질 수 있다.

연구의 시기나 스케일 이외에도 해빈의 지형 변화를 유발하는 다양한 프로세스에 집중한 연구들이 수행되었다. 해빈의 지형 변화를 유발하는 가장 큰 요인은 파랑에너지이며, 부차적으로 조석이 있다고 알려져 있다. 특히 우리나라의 서해안처럼 대조차 환경의 해빈일 경우 조석 프로세스가 미치는 영향을 간과할 수 없는데, 이러한 조석의 영향은 해빈의 동역학 프로세스(swash, surf 등)가 작동하는 구역의 주기적 변화를 유발하는 직접적 영향과 해빈의 지하수위 변동을 통해 지형 변화

를 유발하는 간접적 영향으로 나눌 수 있다. 해빈의 포화 여부에 따라 스워시(swash)와 백워시(backwash)가 일어날 때 침식/퇴적 여부가 결정되는데 이러한 해빈의 포화 여부를 결정하는 것이 지하수위이기 때문에 조석의 간접적인 영향이라도 이를 고찰하는 것은 매우 중요하다고 볼 수 있다(Masselink and Turner, 1999).

지하수 유출과 해빈 지형 변화와 관련된 연구들은, 먼저 지하수위 변동 현상 자체를 측정 및 시뮬레이션하여 그 특성을 밝히고 이에 영향을 미치는 가장 큰 인자를 파악하고자 하였다(Nielsen, 1990). 이후 이러한 지하수위의 변동이 지형 변화에 어떤 영향을 미치는지에 관하여 다양한 연구가 진행되었는데, 많은 모델링 연구들이 지하수 유출로 인한 해빈 단면의 경사급변점 형성과 이로 인한 경사도 변화(Turner, 1993; Turner, 1995a; Turner, 1995b), 지하수위 변동으로 인한 해빈 표면 포화 여부에 따른 스워시/백워시 시기에서의 침식/퇴적 경향 변동(Turner and Masselink, 1998; Butt et al., 2001)을 다루었다(Bakhtyar et al., 2009).

하지만 스워시가 존재할 때의 지하수 침투(유출)에 의한 해빈 지형 변화는 명백히 밝혀지지 않았다. 이는 스워시 구역의 표층 퇴적물에 작용하는 포상홍수(bed flow)와 이에 관한 퇴적물의 안정성에 영향을 미치는 세 가지 요인이 서로 충돌하는 데에서 기인한다. 첫째는 지하수의 침투로 인해 스워시의 부피가 감소하면서 스워시의 에너지가 감소하여 침식(퇴적)에 영향을 미치는 작용이다. 이 경우 스워시의 에너지가 감소하면 퇴적이 우세하여 해빈의 경사가 급해지게 된다. 둘째는 지하수의 침투(유출)이 퇴적물의 효율 하중(effective weight)을 변화시켜 퇴적물의 안정성에 영향을 주는 매커니즘이다. 이 경우 지하수의 침투가 효율 하중을 증가시키면 해빈의 안정성이 증대되어 침식작용이 약화된다. 셋째는 지하수의 침투(유출)이 포상홍수의 두께를 조절하여 해빈 표면에서 퇴적물에 가해지는 힘을 변화시키는 매커니즘이다. 이 경우 지하수의 침투가 포상홍수를 얇게 만들어 하상에 작용하는 힘이 커지게 되면 하상이 불안정해져 침식이 활발해지게 된다. 이와 같이 동일한 지하수의 침투(유출)이 서로 다른 방향으로 작용하게 되는데, 이 때 시기에 따른 각 매커니즘의 상대적인 규모에 따라 해빈의 침식(퇴적) 여

부가 결정되므로 지하수 유출의 영향으로 인한 해빈의 지형 변화에 대해서 명확한 결론이 나지는 못한 상황이다(Horn, 2002; Bakhtyar et al., 2009).

더욱이 해빈 지형을 대상으로 한 대부분의 연구들은 모델을 통한 시뮬레이션 연구로 경험적 연구는 많이 이루어지지 않았으며, 특히 대조차 환경에서 지하수의 유출이 많이 발생할 것으로 예측되는 우리나라 서해안의 해빈에서는 이러한 경험적 연구가 거의 전무하다. 뿐만 아니라 많은 연구들이 스qip시 상황하의 영향만을 다루고 있고, 지하수 유출이 독립적인 프로세스로서 해빈 지형 변화에 미치는 영향은 거의 밝혀지지 않았다. 파랑과 조석 이외에도 포화/불포화 여부가 해빈 지형 변화에 중요한 영향을 미친다는 사실을 고려한다면(Masselink and Turner, 1999), 지하수위의 변동과 지하수 유출이 해빈 지형 변화에 미친 영향을 명백하게 파악하는 것은 전반적인 해빈지형 변화를 이해하는데 중요한 주제가 될 것으로 보인다.

지하수 유출 프로세스에 의한 해빈 지형변화는 그 변화의 함의 때문에 더욱 중요하다. 최근 기후 변화나 인위적 영향으로 인한 해빈 침식을 완화시키기 위해 다양한 방안들이 제시되고 있는데, 그 중 하나로 해빈의 지하수위를 인위적으로 하강시키는 방법이 제시되었다(Turner and Leatherman, 1997). 하지만 덴마크를 비롯한 다양한 지역에서 이를 적용하였는데 명확한 효과가 밝혀지지 않는 않았다. 지하수 유출 프로세스가 어떤 방식으로 지형변화를 유발하는지에 대한 명확한 매커니즘이 밝혀지지 않았기 때문에 이에 대한 연구가 수행되어야 그 효과를 밝힐 수 있을 것으로 보인다.

따라서 이 연구는 기존의 연구들과 대비하여 몇 가지 차별성을 두고자 한다. 먼저 연구시기와 규모로서, 해빈의 여름철 미지형 변화에 주목하고자 한다. 이는 지금까지 소홀하였던 시기와 규모에 대한 연구로서 해빈 지형 변화의 포괄적인 이해에 도움이 될 것으로 판단된다. 또한 연구 주제로서, 지하수 유출이라는 요인이 해빈 미지형 변화에 어떤 방식으로 영향을 주는지를 명백하게 파악하고자 한다. 이는 지금까지 간과되었던 지형 변화 프로세스에 주목함으로써 해빈 지형 변화를 이해하는데 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 연구의 목적

이 연구는 지하수위 측정을 통해 추정한 지하수 유출량이 여름철 해빈의 미시적 지형 변화에 어떠한 영향을 미쳤는지를 밝히고자 한다. 연구 목적은 다음과 같다.

첫째, 여름철에 일어나는 해빈의 지하수위와 지하수 유출량의 변동을 확인한다. 지하수위의 변동은 조위의 변동과 연관성이 있을 것으로 예상된다. 따라서 조차가 다른 사리와 조금의 지하수위 변동을 각각 측정하고, 이를 통해 측정시기 동안 나타난 지하수위 및 유출량의 변동 원인과 특성을 파악하고자 하였다.

둘째, 여름철에 일어나는 해빈의 미지형 변화를 확인한다. 지하수 유출지점을 중심으로 상·하부의 지형변화가 다르게 일어났을 것으로 예상된다. 또한 시점에 따라서도 지형 변화의 차이가 있을 것으로 예상된다. 따라서 이 지점을 중심으로 일어나는 지형 변화를 관측한다.

셋째, 지하수위와 유출량의 변동과 지형 변화량 사이의 관련성을 분석한다. 지하수의 유출로 인한 사면안정성의 변화나 유출 자체가 퇴적물에 가하는 힘으로 인하여 지형 변화가 발생했을 것으로 예상된다.

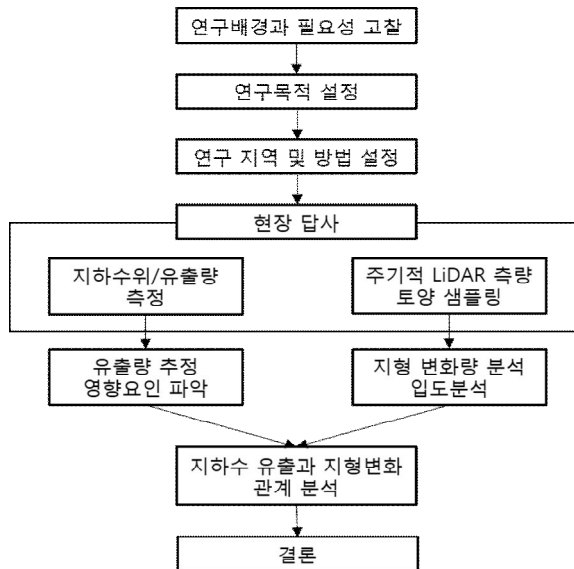


그림 1. 연구의 흐름도

II. 연구지역과 연구방법

1. 연구지역

연구지역인 학ampo 해수욕장은 태안해안국립공원의 일부로, 행정구역상 충청남도 태안군 원북면 방갈리에 위치한다(그림 2). 태안반도의 북부에 위치하여 서해안에 면하고 있으며, 수리적 위치는 북위 $36^{\circ} 89' \sim 90'$, 동경 $126^{\circ} 19' \sim 21'$ 에 해당한다. 학ampo는 분점도와 소분점도를 잇는 육계사주를 중심으로 북쪽에 면한 해빈과 서쪽에 면한 해빈으로 구분된다. 해빈 배후에는 해안사구와 사구습지가 위치하며, 북쪽 해빈의 동쪽 끝과 서쪽 해빈의 남쪽 끝에는 각각 갯이 있고 그와 연결되는 구릉성 산지가 위치하여 학ampo 지역의 경계를 이루고 있다. 육계사주를 중심으로 서측 해빈의 배후와 북측 해빈의 서쪽 배후에는 각종 건물, 주차장 등의 인위적 건축물이 위치한다. 또한 육계사주에는 방파제가 설치되어 항구로 쓰인다. 이로 인한 침식 피해는 거의 없었으며 안정적으로 해빈이 유지되고 있는 것으로 보이나(국토해양부, 2008), 이러한 인위적 건설로 인해 퇴적물의 이동패턴이 분명히 영향 받았을 것으로 판단된다(류호상, 2010).



그림 2. 연구 지역도
출처: 국토지리정보원

학ampo는 태안 지역의 많은 해수욕장들과는 달리 개발이 덜하고 인위적인 해안제방도 없다. 이러한 높은 자연성으로 인해 연구의 적합성이 높다고 판단했다. 뿐만 아니라 학ampo는 해변, 사구, 습지 등의 다양한 해안지형을 한 곳에서 관찰할 수 있는 태안해안국립공원 내 몇 되지 않는 지역이기에 지하수 유동이 각기 다른 지형에서 변동하는 양상을 보다 명확히 관찰할 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구는 학ampo의 북측 해변을 대상으로 한다. 북측 해변은 서쪽의 육계사주와 동쪽의 곳으로 둘러싸인 주머니형 해변(pocket beach)이다. 이 유형의 해변은 퇴적물 공급에 있어서 닫힌 해변이므로 상대적으로 퇴적물의 영향으로 인한 지형변화가 작아 지하수라는 요인에 주목하기 적절하다고 판단하였다. 또한 북측 해변은 서측 해변과는 달리 저조위 시 지하수의 유출 지점과 그 지점에서 경사가 급변하는 모습이 육안으로 명확히 드러나는데(그림 3), 이 점 때문에 북측 해변에서 지하수 유출이라는 요인이 지형 변화에 작용하는 양상을 관찰하기에 더 적합할 것으로 판단하였다. 북측 해변의 서측은 개발 정도가 높고 관광객이 많아 인위적 영향이 크며, 동측은 곳과 근접하여 기반암이 드러나 있는 지점이 많다. 뿐만 아니라 주머니형 해변에서는 해변의 양 끝에 파랑 에너지가 집중되기 때문에 오로지 지하수의 영향만을 관측하기 힘들다. 따라서 본 연구에서는 북측 해변의 중앙을 중심으로 측선을 설정하였다.



그림 3. 연구 지역 (지하수 유출 지점)

학암포에서 가장 가까운 기상 관측지점은 해상의 안도 AWS¹⁾와 학암포 남서쪽의 만리포 AWS²⁾이다. 이를 확인하면 연구지역의 기온은 연교차가 큰 한반도의 기후 특성과 일치하며, 강수 역시 여름철에 집중된다(그림 4).

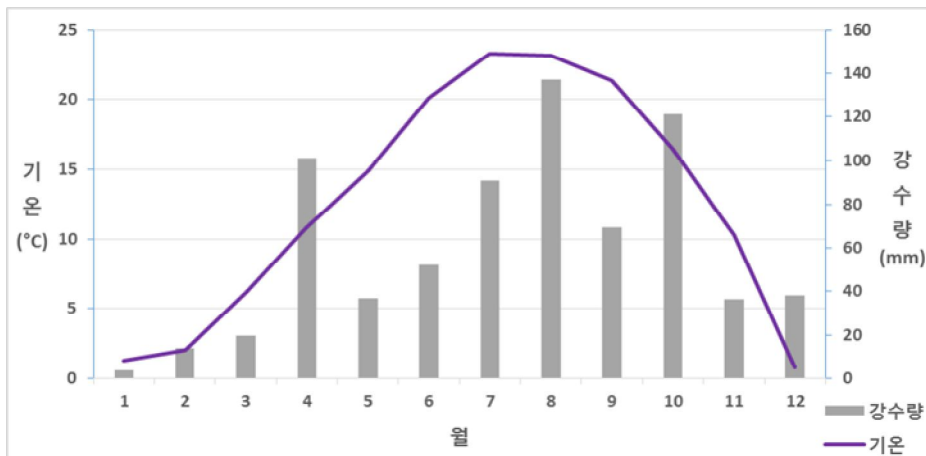


그림 4. 월별 기온과 강수량
출처: 만리포 AWS

풍속의 경우 해상에서는 전반적으로 빠르지만 육지에서는 여름에 뚜렷한 감소를 보인다(그림 5). 측량일자와 지하수위 측정일자인 2015년 8월 29-30일, 9월 5-6일, 9월 19-20일 기간의 평균 풍속은 각각 약 1.31m/s, 약 2.32m/s, 약 2.19m/s이며, 풍향은 일몰 이후에는 남동풍, 일출 이후에는 북풍이 지배적인, 해륙풍이 전환되는 전형적인 모습을 나타냈다.

-
- 1) 행정구역은 충청남도 태안군 원북면 방갈리이며, 연구지역에서 북서쪽으로 약 7.7km 떨어진 해상의 무인도에 위치한다.
 - 2) 행정구역은 충청남도 태안군 소원면 의항리이며, 연구지역에서 남서쪽으로 약 13.3km 떨어진 곳에 위치한다.



그림 5. 월별 평균 풍속

출처: 안도 AWS

파랑의 유의 파고와 파주기는 기상청 가대암 등표³⁾의 자료를 확인하였다. 연평균 유의 파고는 약 0.56m이며, 특히 겨울철(12-2월)에 높고 여름철(6-9월)에 낮은 경향을 보인다. 연평균 유의 파주기는 4.8초이며, 유의 파고와는 반대로 여름철인 7-8월에 크게 나타난다(그림 6). 측량일자와 지하수위 측정일자 동안의 평균유의파고와 평균유의파주기는 다음 표와 같다(표 1).

표 1. 측량 및 지하수위 측정일자 파랑자료

측량/측정일자	평균유의파고 (m)	평균유의파주기 (s)
2015.8.29	1.3	4.9
2015.8.30	0.2	4.7
2015.9.5	0.4	4.4
2015.9.6	0.3	4.2
2015.9.19	0.3	4.0
2015.9.20	0.6	4.6

연구지역의 조석은 반일주조의 특징을 보이며, 국립해양조사원의 2014년 국가해양관측망 연간백서에 따르면 태안 조위관측소⁴⁾에서의 관

3) 연구지역에서 남서쪽으로 약 30km 떨어져 있으며, 위도 36° 46' 12"N, 경도 125° 58' 36"E에 위치한다.

4) 행정구역은 충청남도 태안군 원북면 방갈리이며, 연구지역에서 북동쪽으로 약

측 평균 해면은 398.0cm, 평균 고극조위 790.5cm, 평균 저극조위 6.0cm, 약최고고조위 781.8cm, 대조차 651.4cm, 소조차 277cm로 평균조차는 464.2cm이다.

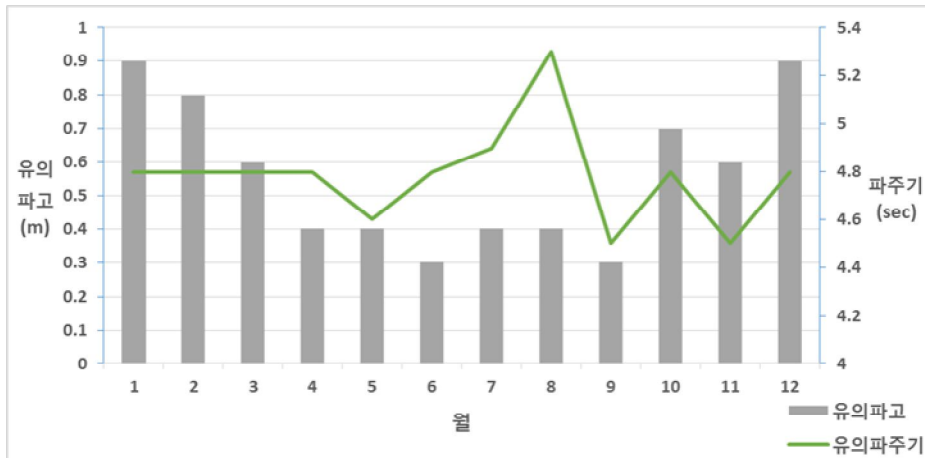


그림 6. 월별 유의 파고와 파주기
출처: 가대암 등표

2.7km 떨어진 곳에 위치한다.

2. 연구방법

1) 연구자료의 수집

연구지역의 수문과 지형변화를 파악하기 이전에 먼저 연구지역 해빈의 물리적 특성을 파악하였다. 이를 기반으로 수문과 지형변화의 연관성을 해석하기 위함이다. 이후 지하수위의 변화와 지형변화를 측정 및 측량고 이를 통해 얻은 자료를 분석하였으며, 그 자세한 과정은 다음과 같다.

(1) 연구지역 해빈의 유형

해빈은 지역의 특징이나 파랑, 조석, 퇴적물의 특성 등 해빈에 영향을 미치는 변수에 따라 매우 다양한 형태로 나타난다. 다양한 해빈의 형태를 특정한 몇 가지의 유형으로 분류하려는 시도가 꾸준히 존재해 왔는데, 이러한 분류는 비록 정확하게 일치하지는 않지만 대략 특정한 해빈에서 어떠한 변수가 우세한 영향을 미치고 있는지를 판단하기 쉽도록 도와준다. 따라서 연구지역 해빈의 유형을 판단하고, 연구지역에 영향을 미치고 있는 각 변수의 상태와 해빈의 형태를 파악하여 지하수 유출이 해빈 지형에 미치는 영향을 살펴보기 이전의 기본적인 조건을 파악하고자 하였다.

해빈의 유형을 분류하는 데에는 매우 다양한 기준이 있지만, 파랑과 조석의 영향을 고르게 반영한 것은 무차원 침강속도 Ω (Dimensionless Fall Velocity)와 상대조차(RTR, Relative Tide Range)를 이용한 분류이다(Masselink and Turner, 1999). 여기서는 해당 변수의 정량적 수치에 따라 해빈의 유형을 결정하게 된다(Masselink and Short, 1993). 따라서 본 연구에서는 구득한 파랑자료와 입도 자료를 이용하여 각 파라미터를 계산하였으며, 그 과정은 다음과 같다(식 2-1~3).

$$\Omega = \frac{H_b}{W_s T} \dots\dots\dots (\text{식 2-1})$$

무차원 침강속도는 위 <식 2-1>과 같이 표현되며, 쇄파고(H_b)는 다음 <식 2-2>로 나타낼 수 있으므로 무차원 침강속도를 다시 <식 2-3>과 같이 표현할 수 있다(Komar and Gaughan, 1972).

$$H_b = 0.39g^{\frac{1}{5}} (H_0^2 \cdot T)^{\frac{2}{5}} \dots\dots\dots (\text{식 2-2})$$

$$\Omega = \frac{H_b}{W_s T} = \frac{0.39g^{\frac{1}{5}} (H_0^2 \cdot T)^{\frac{2}{5}}}{\frac{1}{18} \frac{(\rho_s - \rho_{sw}) T}{\mu} g d^2} \dots\dots\dots (\text{식 2-3})$$

여기서 H_0 는 심해파고(m)이며, T 는 심해파주기(s)이다. 이는 가대암 등표에서 측정한 자료를 대입하였다. ρ_s 는 퇴적물의 밀도(kg/m^3)로, 후술할 표층 퇴적물 분석을 통해서 직접 계산하였다. ρ_{sw} 는 해수의 밀도이며, μ 는 해수의 동점성계수로, 가대암 등표에서 측정한 수온 및 태안 조위관측소에서 측정한 염도를 대입하여 계산하였다. g 는 중력가속도(m/s^2)이며, d 는 입경(m)이다.

(2) 연구지역 퇴적물의 물리적 특성

연구지역의 입도 분포 및 퇴적물 특성과 전술한 해빈 유형 파악, 후술할 유출량 추정과 해빈 평형경사 분석에 이용될 파라미터 계산을 위해 표층 퇴적물 입도 분석을 실시하였다. 2015년 8월 29일 관정 위치를 따라 가상의 직선상에서 표층 퇴적물 샘플을 15개 채취하였으며, 각각의 관정에서 깊이에 따라 7월 30일에 11개의 시료를 채취하였다. 퇴적물의 특성은 일반적으로 단기간 내에 크게 변동하지 않기 때문에 (Short, 1999), 다양한 시기에 여러 번 퇴적물을 채취하지 않고 한 시점에만 채취하였다.

야외 시료 채취 장소는 측선을 따라 지하수 유출지점 상부와 하부, 사구, 습지 지역에서 각각 3개 이상의 시료를 확보할 수 있도록 선정하

였다. 표층 퇴적물 시료는 100g 이상을 확보하였으며, 채취한 시료를 비닐백에 넣어 외부의 불순물이 유입되지 않도록 하였다.

투수계수를 계산하기 위한 파라미터로 밀도, 부피, 질량을 계산하기 위해 채취한 시료 50g 내외를 건조시켰다. 건조된 시료의 무게(M_s)와 부피(V_s)를 측정한 후 비커에 넣고 공극이 포화될 때까지 물을 부어 그 부피(V_f)를 측정하였다. 이를 바탕으로 밀도(식 2-4)와 공극률(식 2-5)을 계산하였다(선우중호, 2006). 이렇게 계산된 파라미터는 후술할 투수계수를 도출하는데 이용하였다.

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} (g/cm^3) \dots\dots\dots (식 2-4)$$

$$f = \frac{V_f}{V_t} \dots\dots\dots (식 2-5)$$

한편 동일한 시료 50g 내외를 건조하여 입도분석을 실시하였으며, 이를 통해 지하수 유출 지점 상부와 하부의 표층 퇴적물의 물리적 특성을 비교하고자 하였다. 먼저 시료를 섭씨 60도에서 48시간 이상 건조시킨 후 비커에 담아 400도의 온도에서 4시간 이상 가열해 유기물을 제거하였다. 이를 다시 10% 과산화수소 용액과 10% 염산 용액을 사용하여 탄산염을 제거하였다. 전처리 과정이 끝난 후 시료를 재건조시키고, 이를 Sieve Shaker MOD. RP(CISA)를 이용하여 표준망 체(-0.5Φ, 0Φ, 0.5Φ, 1Φ, 1.5Φ, 2Φ, 2.5Φ, 3Φ, 3.5Φ, 4Φ)로 퇴적물을 입도별로 분리하고 무게를 측정하였다. 이후 Folk and Ward 방법에 의거하여 평균 입도(M_G)와 분급(σ_G) 및 왜도(Sk_G), 첨도(K_G)를 GRADISTAT ver.8 프로그램을 이용하여 계산하였다(Blott and Pye, 2001).

(3) 지하수위 측정

북측 해빈의 중앙에 설정한 측선을 따라 시간에 따른 지하수위의 변동을 관찰하기 위해 해빈, 사구, 습지에 각각 관정을 설치하였다(그림

7). 해빈에 설치된 관정은 해발 3.45m 지점에 위치하여 사리 때의 만조 전후 외에는 잠기지 않도록 하였다. 사구에 설치된 관정은 사구와 해빈의 식생 경계 부근, 해발 약 5.25m 지점에 위치하며 해빈 관정에서 내륙 방향으로 약 11.3m 떨어져 있다. 습지에 설치된 관정은 사구의 배후 습지 초입, 해발 약 3.43m 지점에 위치하며 해빈 관정에서 내륙 방향으로 약 92.4m 떨어져 있다. 습지와 해빈의 관정은 각각 2m 깊이로 설치하였으며, 사구의 관정은 4m 깊이로 설치하였다. 관정은 지름이 70mm인 PVC 파이프를, 측면은 차단되어 있지만 하단부가 개방되어 지하수가 유동할 수 있는 구조이다(그림 8). 관정은 모두 hand-auger로 직접 설치하였으며, 관정 설치로 인하여 나타날 수 있는 지하수면의 왜곡을 완화시키기 위해 설치 이후 약 1개월 정도의 안정화 기간을 두고 그 이후에 자료를 수집하였다.

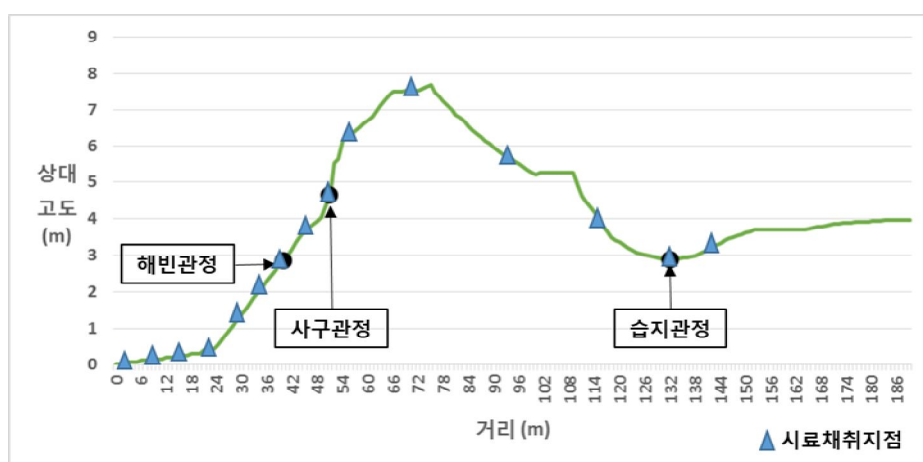


그림 7. 측선 단면도

시간에 따른 지하수위의 변동 자료를 각각의 관정에서 매 30분 간격으로 수위를 측정하여 수집하였다(표 2). 바다에 가까울수록 지하수위는 급격하게 변하고 시차도 존재할 것으로 예상되므로(Clarke and Eliot, 1987), 자료의 해석을 위해서는 고해상도의 자료가 필요하다고 판단하였다. 매 분마다 측정이 어려운 점을 감안하여 최대한 자료의 시간 해상도를 훼손시키지 않도록 30분 간격으로 측정하였다. 사리와 조

금을 중심으로 측정하였는데, 이는 사리와 조금이 각각 조위의 극값으로서 자료를 비교하기에 적합하다고 판단하였기 때문이다. 또한 지하수위는 조석이 3번 왕복하는 동안(약 37.5시간) 측정하였는데, 이는 변수의 변동성에서 나타나는 노이즈를 최대한 제거하고 자료의 경향성을 보다 잘 파악하기 위함이다. 지하수위는 수위측정계를 이용하여 수동으로 측정하였다. 센서와 물이 접촉될 때 전기전도도가 증가하는 방식을 이용한 것으로, 물에 염분이 포함된 경우에도 문제없이 작동할 수 있는 수위측정계를 사용하였다.

표 2. 지하수위 측정 일시 및 특이사항

일 시	비 고
2015.08.29.-30.	29일 16시간, 30일 8시간 수집
2015.09.05.-06.	38시간 연속 수집
2015.09.19.-20.	36.5시간 연속 수집

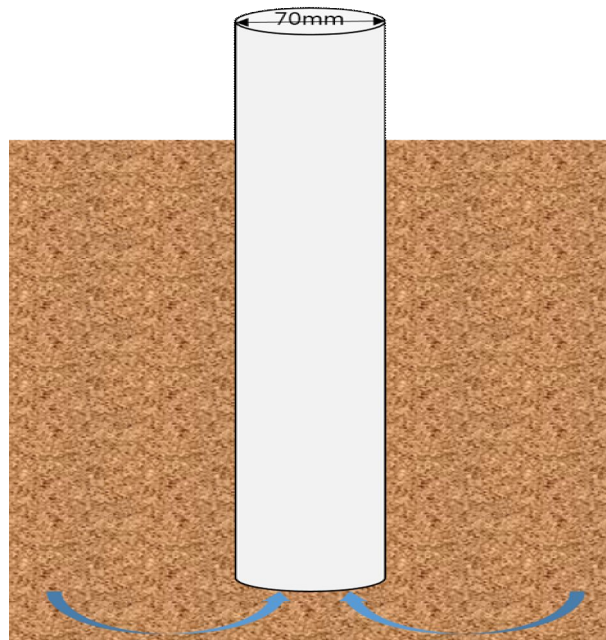


그림 8. 관정의 구조

(4) 지하수 유출량의 측정과 추정

해안의 지하수는 바다 방향으로의 기저유출로 흘러나가게 된다. 따라서 지하수의 유출로 인해 일어나는 지형 변화를 파악하기 위해서는 지하수 유출량을 파악하는 작업이 선행되어야 한다. 지하수의 유출량을 확인하는 방법은 매우 다양하다(김용호, 2006). 첫째는 Darcy 방법을 활용한 것으로, 지하수의 흐름 이론에 근거하여 이론적 기반이 명확하다(선우중호, 2006). 둘째는 물수지 분석 방법을 활용한 것인데, 유입량과 유출량이 장기적으로 평형을 이룬다는 점에 근거하여 계산된 유입량을 바탕으로 유출량을 추정하는 방법이다. 셋째는 방사성 동위원소를 활용한 추적자(tracer) 방법으로, 지하수에 용해되어 있는 화학물질의 농도를 이용하여 유출량을 추정하는 기법이다(Burnett and Dulaiova, 2003). 마지막으로 투수계(seepage meter)를 이용한 방법으로, 직접 해저의 특정 지점에 투수계를 설치하여 유출되는 지하수를 포집하는 방식이다(Taniguchi et al., 2006). 본 연구에서는 단기간의 유출량 추정이 가능하면서도 이론적 기반이 명확한 Darcy 방법을 활용하여 지하수 유출량을 추정하였으며, 부차적으로 투수계를 직접 설치하는 방법을 통해 지하수 유출량을 측정하였다.

지하수 유출량은 기본적으로 Darcy 방법(Fetter, 2001; 선우중호, 2006)을 이용하여 추정하였다(식 2-6).

$$Q_t = \left(-K \frac{dh_t}{dl_t} \right) A_t \dots\dots\dots (\text{식 2-6})$$

시점 t 에서의 유출량 Q_t 는 속도차원을 가지며, 동일 시점에서의 동수경사(Hydraulic gradient)에 투수계수 K 와 흐름 단면적 A_t 을 곱하여 구한다. 동수경사는 해안선에서 가장 가까운 관정의 지하수위로부터 다음과 같이 추정할 수 있다(식 2-7).

$$\frac{dh_t}{dl_t} \approx \frac{H_t}{L_t} \dots\dots\dots (\text{식 2-7})$$

특정 시점 t 에서의 동수경사는 관정이 위치한 지점의 지하수위 H_t 와 지하수 유출지점에서 관정까지의 거리 L_t 의 비에 근사한다(양정석 등, 2004). 본 연구에서는 유출량을 최대한 정확하게 추정하기 위해 해수면에서 가장 가까운 해빈 관정의 지하수위 자료를 이용하였다. 지하수 유출지점에서 해빈 관정까지의 평면거리인 L_t 는 조위에 따라 계속 변동하는데, 이를 시점에 따라서 모두 계산에 적용하였다. 다만 유출면 이상으로 조위가 상승하였을 때는 유출지점 대신 해수면과 관정 사이의 거리로 L_t 를 계산하였다. 투수계수 K 는 전술한 표층 퇴적물 샘플링을 통해 필요한 파라미터를 산출한 후 다음의 경험식(식 2-8.9)에 대입하여 도출하였다(Turner, 1993). 이를 통해 지하수 유출량도 30분 간격으로 동일한 시계열 데이터를 구축하였다.

$$k = 760D^2e^{1.31\sigma_\phi} (1 \text{ Darcy} = 0.987 \times 10^{-12} m^2) \dots\dots\dots (\text{식 2-8})$$

$$K = \frac{kg}{v} \times 0.987 \times 10^{-12} (m/s) \dots\dots\dots (\text{식 2-9})$$

<식 2-8>에서의 D 는 평균 입도(mm)이며, σ_ϕ 는 분급(ϕ 단위)이고, k 는 고유투수계수(intrinsic permeability)이다. <식 2-9>에서 v 는 해수의 동점성계수(kinematic viscosity of sea water)이며, g 는 중력가속도이다.

흐름 단면적 A_t 의 경우 누출계의 폭인 0.55m로 계산하였다. 이는 해빈의 전 구역에서 유출량을 추정하는 것은 투수계수 및 기타 변수의 차이로 인하여 정확도가 떨어질 뿐만 아니라 본 연구에서는 측선을 중심으로 미시적인 지형 변화에 주목하였기 때문이다. 선정된 폭 내부에서는 투수계수 및 여타 변수들의 차이가 상대적으로 적을 것으로 판단되며, 따라서 추정한 유출량의 정확도 역시 상대적으로 신뢰할 수 있다고 판단하였다. 이렇게 추정한 유출량에서 해빈의 지하수위가 조위보다 낮아 지하수 유출 지점이 해수면과 연동되는 시기에는 지하수 유출이 일어나지 않고 침투가 된다고 가정하여 해당 시점의 지하수 유출량을 0으로 추정하였다.

본 연구에서는 실제 유출량도 관찰하기 위해 투수계를 직접 제작하여 측정하였다. 투수계는 200L 드럼통이 하부가 뚫리도록 절단하여, 상부에 밸브를 달아 유출되는 지하수를 밸브에 연결된 샘플백을 통해 집수할 수 있도록 제작되었다(그림 9). 구조 상 해수면 밑에 위치한 경우에만 측정이 가능하기 때문에 연속으로 측정하지는 못하였으며, 창조/낙조 시에 지하수 유출면 상/하부에서 각각 한 번씩 측정하였다. 이 자료는 Darcy 공식을 통해 추정된 유출량을 확인하는데 이용하였다.

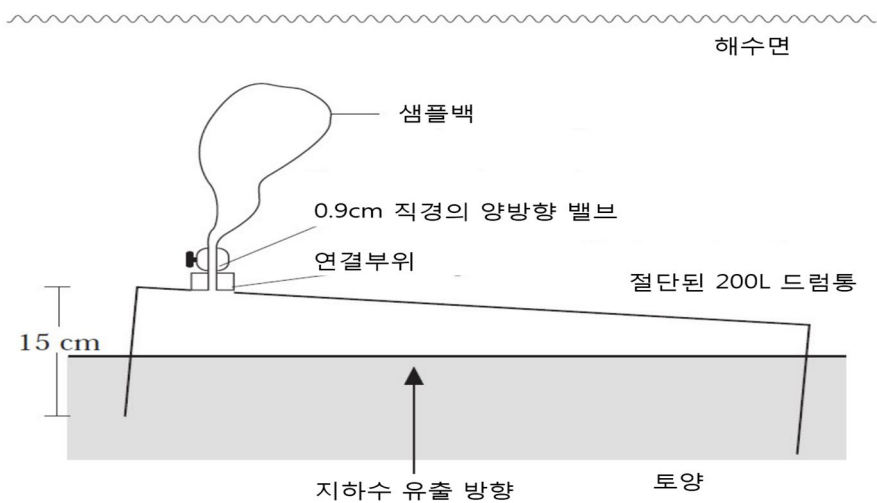


그림 9. 투수계의 구조
출처: Cable et al.(1997) 수정

(5) 지형변화 측량

본 연구에서는 지상 LiDAR(Light Detection and Ranging) 장비를 이용하여 연구지역의 미지형 변화를 측량하였다. 현재까지 해빈 지형을 연구하기 위한 방법은 광파측거기를 이용한 해빈 측량, RTK(Real time kinematic) - GPS(Global Positioning System)를 이용한 측량, 항공사진 분석 등이 주로 이용되었다. 그러나 위와 같은 방법들은 단기간에 해빈의 미지형을 분석하기에는 시/공간 해상도가 높지 못하였다. 따라서 본 연구에서는 보다 세밀하고 정량적인 지형 분석을 위해 지상

LiDAR 장비를 이용하였다(Saye et al., 2005; Pietro et al., 2008; 심재설 등, 2010; 윤순옥 등, 2013). 측량에 이용한 지상 LiDAR 장비는 Leica ScanStation P16이다. 제원은 다음 표와 같다(표 3).

표 3. Leica ScanStation P16 제원

단일 측정 정확도	-
범위 정확도	1.2mm + 10ppm
각도 정확도	수직 및 수평 8도
3차원 위치 정확도	40m 거리에서 3mm
측정 속도	초당 1백만 포인트 이상

측량은 사리와 조금 각각 1회, 낙조 이후 지하수 유출면이 드러났을 때 지하수 유출지점을 중심으로 실시하였다(표 4). 조위 변동의 양 극값을 보이는 사리와 조금을 관측함으로써 자료를 비교하기에 적합하도록 설계하였다. 지하수위 측정 간격과 동일하게 매 30분마다 측량을 하였으며, 다시 조위가 상승하기 전에 측량을 종료하였다. 따라서 각각의 측량 기간 동안 해빈에 미치는 파랑의 영향은 배제되었다. 조석의 영향 역시 지하수위를 변동시키는 간접적인 영향 이외에 직접적인 영향을 최대한 배제하였다. 해당 측량 시점에 강수는 없었으므로 해빈에 미치는 강수의 영향 또한 배제되었다. 전술하였듯 측량 기간에는 해풍이 우세하였고 풍속이 약하였으므로 바람이 젖은 해빈 표면에서 비사를 이동시키기에는 충분치 않았다고 판단하였다(Cornelis and Gabriels, 2003). 따라서 본 연구에서 설정한 측량 기간 동안 해빈에 미치는 다른 요인을 효과적으로 배제하였으며, 이에 따라 측량 기간 동안 발생하는 미지형 변화는 지하수 유출에 의해 발생하였다고 해석할 수 있다.

측량 지점은 지하수 유출면 상부와 하부의 미지형 변화를 동시에 관측하기 위해 지하수 유출지점을 기준으로 삼았다. 또한 짧은 시간 단위에서 미지형 변화를 관찰하기 위해 다수의 측량 지점을 선택하는 대신 지하수 유출지점을 중심으로 반경 약 100m 크기의 지역을 3mm의 해상도로 측량하였다. 이를 통해 해안선에 대해 수직방향(cross-shore)의 단면 변화뿐만 아니라 면 단위의 지형 변화량을 파악할 수 있었다. LiDAR 측량 시 모든 좌표는 TM 중부 원점을 기준으로 하는 절대좌표

로 획득되었기 때문에 기준원점좌표를 따로 설정하지는 않았다.

표 4. 지상 LiDAR 측량 일시 및 특이사항

일 시	비 고
2015.08.29. 0900-1130	사리, 2.5시간 동안 6회 측량
2015.09.19. 1130-1530	조금 2일 전, 4시간 동안 9회 측량

2) 연구자료의 분석

(1) 지하수위와 유출량 자료의 주기와 시간 지체

지하수위 및 지하수 유출량, 조위 등 본 연구에서 수집한 다양한 변수들은 시계열 자료의 형태로 얻어지게 된다. 지하수 및 조석에 의한 조위 변동 등 본 연구에서 이용한 자료는 주기성(periodicity)을 보이므로, 자료의 주기를 파악하는 것이 필수적이다. 따라서 30분 간격으로 수집된 시계열 자료의 주기를 파악하기 위해 본 연구에서는 그래프로 도시한 자료를 기술적(descriptive)으로 접근하였다. 이를 통해 지하수위 변동의 특성을 파악하고 조위의 변동이 지하수위 변동과 어떠한 연관성을 가지고 있는지를 분석하였다.

지하수위의 변동과 지하수 유출량은 해안선에 가까울수록 조석에 의해 영향을 크게 받는다고 알려져 있다(Clarke and Eliot, 1987; Baird and Horn, 1996; Ataie-Ashtiani et al., 2001; Horn, 2002; Horn, 2006). 하지만 지하수위는 해수면의 변화에 대하여 일정한 시간 지연이 나타난다. 따라서 조석에 따라 해수면이 변동할 때 지하수위와 유출량이 어느 정도의 시간 지체(time lag)를 보이는 지는 매우 중요하다. 특정 시점에 더 많은 유출량이 발생하면 해당 시점의 지형 변화를 살펴봄으로써 둘 사이의 관계를 정확하게 파악할 수 있기 때문이다.

본 연구에서는 지하수 관련 시계열 자료와 조석으로 인한 해수면 변동과의 지체 시간을 파악하기 위해 교차 상관분석(Cross Correlation Analysis)을 시행하였다. 이 방법은 특정한 시계열 자료에 대해 다른 시계열 자료에 지체를 두면서, 상관계수의 시간에 따른 분포를 파악하여 가장 관련성이 높은 지체 시간을 파악할 수 있다. 알고리즘은 다음 식과 같다(Lewis, 1995).

$$\gamma_{XY}(k) = Cov(X_t, Y_{t+k}) = E[(X_t - \mu_x)(Y_{t+k} - \mu_y)] \dots\dots\dots (\text{식 2-10})$$

$$\rho_{XY}(k) = \frac{\gamma_{XY}(k)}{\sqrt{\gamma_{XX}(0)\gamma_{YY}(0)}} \text{ for } k = 0, 1, 2\dots \dots\dots (\text{식 2-11})$$

<식 2-11>에서 시계열 X 와 Y 의 교차공분산은 $\gamma_{XY}(k)$ 으로 정의되고, 교차상관함수(Cross correlation function: CCF)에서 도출된 교차상관계수는 <식 2-12>에서 $\rho_{XY}(k)$ 로 정의되며, $\gamma_{XX}(0)$ 와 $\gamma_{YY}(0)$ 는 각각 X 와 Y 의 분산을 의미한다. 본 연구에서는 조위 변동 자료를 기준으로 각각의 지하수 관련 변수 시계열 자료에 지체를 두면서 분석하여, 시간에 따른 상관계수 분포를 그래프로 도시하였다. 이를 바탕으로 각각의 변수가 조위 변동과 가장 상관관계가 높은 시간을 실제 지체된 시간이라고 판단하였다. 이 분석을 위해 전술한 알고리즘을 제공하는 R Studio 3.2.2를 이용하였다.

(2) 미지형변화

지상 LiDAR 측량을 통해 획득한 3차원 좌표 데이터는 DEM을 제작하여 지형 변화 분석에 이용하였다. 먼저 지하수 유출 지점을 중심으로 길이 40m, 폭 30m의 직사각형을 설정하여 그 내부의 지형 변화만을 분석하였다. 이는 측량 장비의 3차원 오차가 40m의 수평 거리에서 3mm의 오차를 가지기 때문이며, 본 연구는 작은 규모의 미지형 변화에 초점을 맞추었기 때문이다. DEM의 해상도는 3cm로 제작하였는데, 이는 발자국이나 각종 부유물 및 생물활동으로 인한 지형 변화 영향을 분석에서 최대한 제거하기 위함이다. 제작 과정은 지상 라이다로 측량한 포인트 데이터에서 TIN(Triangulated irregular Network)기법을 적용하여 DEM을 제작하였다. DEM 제작과 분석에는 Blue Marble Geographics 사의 Global Mapper 17.1을 이용하였다.

제작된 DEM을 이용하여 설정한 격자 내부에 가상의 직선을 설정하고 여기에 투영된 프로파일을 각각의 측량 시점마다 비교하였다. 이를 통해 시간에 따른 단면 변화를 그래프로 시각화하였다. 가로축은 거리, 세로축은 고도로 표현하였으며, 이를 통해 전체적인 단면 양상 및 단면

변화를 기술하였다. 사리와 조금 간의 차이점을 중심으로 파악하였으며, 지하수 유출 지점을 중심으로 나타나는 경사도 변화를 면밀히 분석하였다.

그래프만을 활용할 경우 모든 시기에 대해 정량적으로 비교할 수 없다는 단점이 존재하므로 설정한 격자 내부의 지형변화량을 정량적으로 파악하였다. 이를 통해 측량 시점 간 지형변화량을 확인하여 침식·퇴적 경향성을 포함한 해빈 미지형 변화의 시·공간적 특징을 면밀히 분석하였다. 특히 측량 시점마다 설정한 격자 내부에서 유출지점 상부와 하부의 지형변화량을 각각 정량적으로 비교하였다. 또한 사리와 조금 사이의 지형변화량의 정량적 차이를 파악하였다.

(3) 지하수 유출량과 미지형변화와의 관계

추정된 지하수 유출량 자료와 분석한 지형변화량을 바탕으로 유출량의 증감과 지형변화량의 추이를 파악하여 어느 시점에 지형변화량이 더 많이 일어났는지를 분석하였다. 지형변화에 영향을 미치는 다른 요인들이 통제되었으므로, 측량한 지형변화는 곧 지하수 유출에 의한 것이라고 판단할 수 있다. 따라서 사리와 조금 사이의 유출량 차이와 더불어 창조·낙조 간의 유출량 차이와 이로 인한 지형변화의 차이를 연동하여 살펴봄으로써 지하수의 유출이 지형변화에 얼마나 영향을 주었는지를 분석하였다.

지하수위의 변동으로 인한 해빈의 포화/불포화 상태 변화는 지하수의 유출 지점을 기준으로 하부(식 2-12)와 상부(식 2-13)의 평형 경사 차이에도 영향을 준다(Turner, 1995a). 따라서 현재 연구지역의 상태가 평형 상태인지를 다음의 식을 통하여 분석하고, 이를 통해 연구 시점에서 나타난 지형 변화가 장기적으로는 어떻게 진행될 것인지를 예측하고자 하였다.

$$\tan\beta_e = 0.05(\Omega)^{-0.5} \dots\dots\dots (\text{식 2-12})$$

$$\tan\beta_e = 0.15(\Omega)^{-0.5} \dots\dots\dots (\text{식 2-13})$$

위 식에서 β_e 는 평형 상태의 단면 경사도를 말하며, Ω 는 무차원 침강속도(Dimensionless Fall Velocity)로 쇄파고(H_b)를 파주기(T)와 입도 혹은 퇴적물 침강속도(W_s)로 나눈 값이다(식 2-1).

III. 지하수 유출량의 변동과 해빈 미지형변화

1. 연구지역의 지형

1) 해빈의 유형

해빈 지형에는 다양한 프로세스가 영향을 미치지만, 가장 주요한 프로세스는 파랑이다. 특히 우리나라 서해안과 같은 대조차 해빈에서는 파랑 이외에 조석 역시 해빈의 형태에 유의미한 변화를 유발한다. 따라서 파랑을 반영하는 무차원 침강속도 Ω 와 조석을 반영하는 상대조차 (RTR, Relative Tide Range) 파라미터를 활용한 해빈의 분류가 이전보다 설득력이 있다고 볼 수 있다(Masselink and Turner, 1999). 따라서 본 연구에서는 구득한 파랑자료와 표층 퇴적물 입도 분석에서 얻은 자료를 바탕으로 <식 2-1~3>에 따라 무차원 침강속도 Ω 와 상대조차를 계산하고(표 5), 선행연구에서 제시된 분류 기준(그림 10)에 따라 연구지역의 해빈 유형을 판단하였다.

표 5. 연구 지역의 무차원 침강속도와 상대조차

일시		쇄파고(H_b)	퇴적물 침강속도(W_s)	상대조차 (RTR)	Ω
8.29	상부	0.58	0.5	11.3	0.22
	하부		0.06		1.93
	전체		0.23		0.47
9.5	상부	0.43	0.5	15.18	0.19
	하부		0.06		1.68
	전체		0.23		0.41
9.19	상부	0.36	0.5	18.06	0.17
	하부		0.06		1.51
	전체		0.23		0.37
연평균	상부	0.72	0.4	8.99	0.38
	하부		0.08		1.88
	전체		0.18		0.83

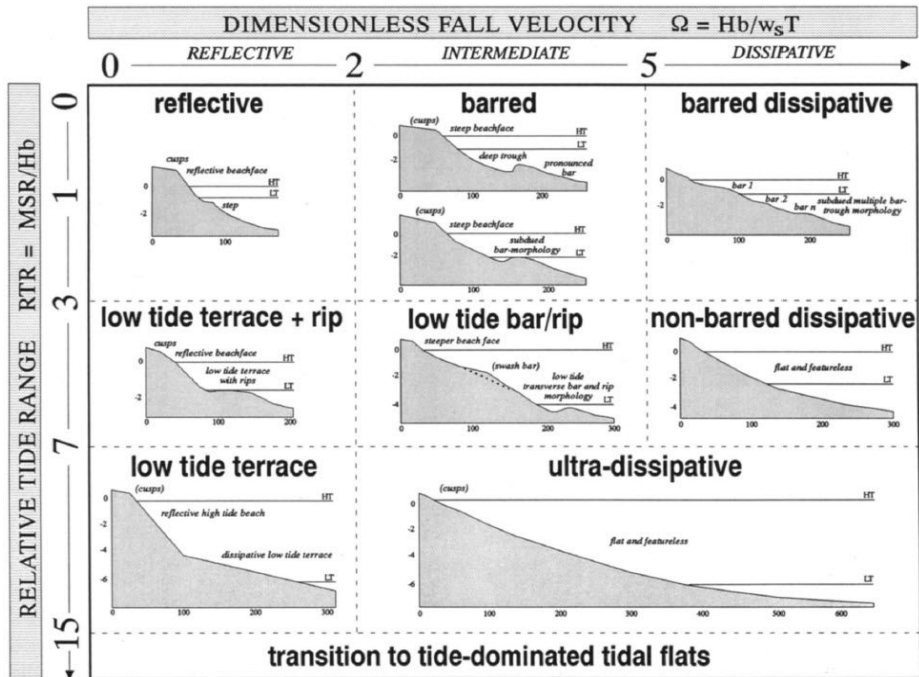


그림 10. 상대조차와 무차원 침강속도에 따른 해변 유형 분류
출처: Masselink and Short(1993)

연구지역의 Ω 는 전반적으로 2 이하의 값을 가지며, 상대조차는 9 이상의 값을 보였다. 이를 Masselink and Short(1993)이 제시한 해변 유형 분류에 대입하면 연구 지역인 학암포 북측 해변은 상대조차가 7-15의 값을 가지며 Ω 가 0-2의 값을 보이는 low tide terrace 유형으로 분류할 수 있다. 해당 유형의 형태 또한 경사급변점을 중심으로 급경사의 반사성(reflective) 해변과 완경사의 소산성(dissipative) 조건대로 이루어져 있다는 점에서 연구지역의 형태(그림 6)와 일치함을 알 수 있다. 특히 지하수 유출이 발생하는 곳이 연구지역 해변에 나타나는 경사급변점과 일치하므로 이러한 유형의 해변 지형변화에 지하수 유출이 미치는 영향이 탁월할 것으로 추측된다.

2) 입도 분포

연구지역 해변의 표층 퇴적물의 물리적 특성과 입도 분포를 확인하

기 위해 실시한 입도분석의 결과를 지하수 유출지점을 기준으로 위치를 나누어 표시하였다(표 6).

표 6. 경사도와 입도 분석 결과

구분	바다 방향	유출지점	내륙 방향	사구
경사도(°)	1.13		7.82	-
평균 입도(Φ)	1.549	0.532	0.739	1.346
분급(Φ)	0.423	0.679	0.835	0.710
왜도(Φ)	-0.399	0.324	-0.017	-0.448

그 결과 연구지역의 입도는 지하수 유출지점을 기준으로 극명하게 나누어지는 것을 볼 수 있다. 바다 방향으로 기울기가 완만해지는 유출지점 하부에서는 입도가 상대적으로 세립해지고 분급이 좋은 퇴적물이 분포하였다. 반면 경사가 급해지는 유출지점 상부에서는 입도가 상대적으로 조립해지고 분급이 좋지 않았다. 왜도는 유출지점 상부에서 가장 작게 나타났다. 사구의 경우 상대적으로 유출지점 하부의 퇴적물 특성과 유사하게 나타났으나 분급은 그보다 좋지 않았다.

이러한 연구지역의 입도 분포는 전술하였던 low tide terrace 해빈 유형의 전형적인 모습으로, 경사급변점을 중심으로 바다 방향에서는 주로 침식 경향이 우세하고 육지 방향에서는 주로 퇴적이 우세함을 의미한다. 따라서 이러한 해빈 조건에서 지하수 유출이라는 프로세스가 유발하는 해빈 미지형 변화의 방향이 어떠한 것인지를 고찰하고자 한다.

2. 지하수위와 유출량의 변동 특성

1) 지하수위와 유출량 변동성의 주기

조위 자료의 주기 파악을 위하여 FFT(Fast Fourier Transform) 분석을 시행하였다. 그 결과 주기는 각각의 측량시기에 따라 다음 표와 같이 도출되었다(표 7). 이에 따르면 조위는 반일주조의 특성을 보이는 조석의 특징을 그대로 반영하는 모습을 보인다. 조위 자료에 측정한 지하수위 자료 및 추정한 지하수 유출량 자료를 그래프에 함께 도시하였다(그림 11-13). 제시된 지하수위 자료는 해수면을 기준으로 한 고도이다. 그리고 각각의 지하수위의 기술적 통계를 구하여 분석하였다(표 8).

표 7. 조위 변동 자료에 대한 FFT 분석 결과

일 시	주 기(Hz, $\times 10^{-5}$)
2015.08.29.-30.	2.235 (12.43h)
2015.09.05.-06.	2.193 (12.66h)
2015.09.19.-20.	2.283 (12.17h)

표 8. 관정 위치별 지하수위 자료의 기술적 통계

구분	2015.08.29.-03.			2015.09.05.-06.			2015.09.19.-20.		
	평균 (cm)	표준 편차	변동 계수	평균	표준 편차	변동 계수	평균	표준 편차	변동 계수
해빈	246.2	38.12	0.155	220.0	21.66	0.098	211.3	18.45	0.087
사구	245.8	15.81	0.064	225.8	8.810	0.039	219.0	5.809	0.027
습지	252.1	1.834	0.007	270.1	0.846	0.003	259.2	0.843	0.003
유출량 (m)	25.02	15.72	0.628	24.94	14.14	0.545	22.42	14.02	0.625

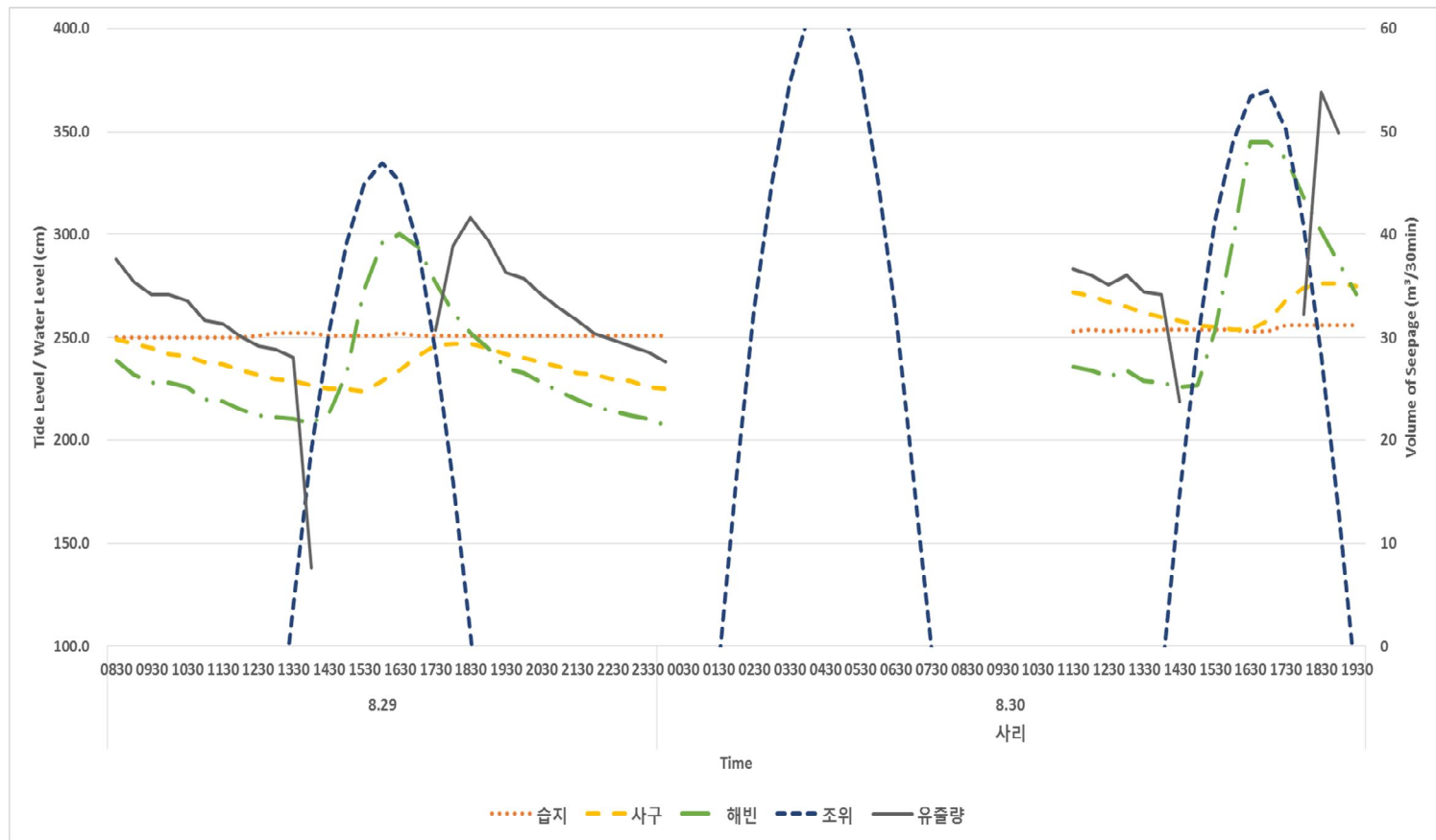


그림 11. 지하수위 및 유출량 변동 (2015.08.29.-30.)

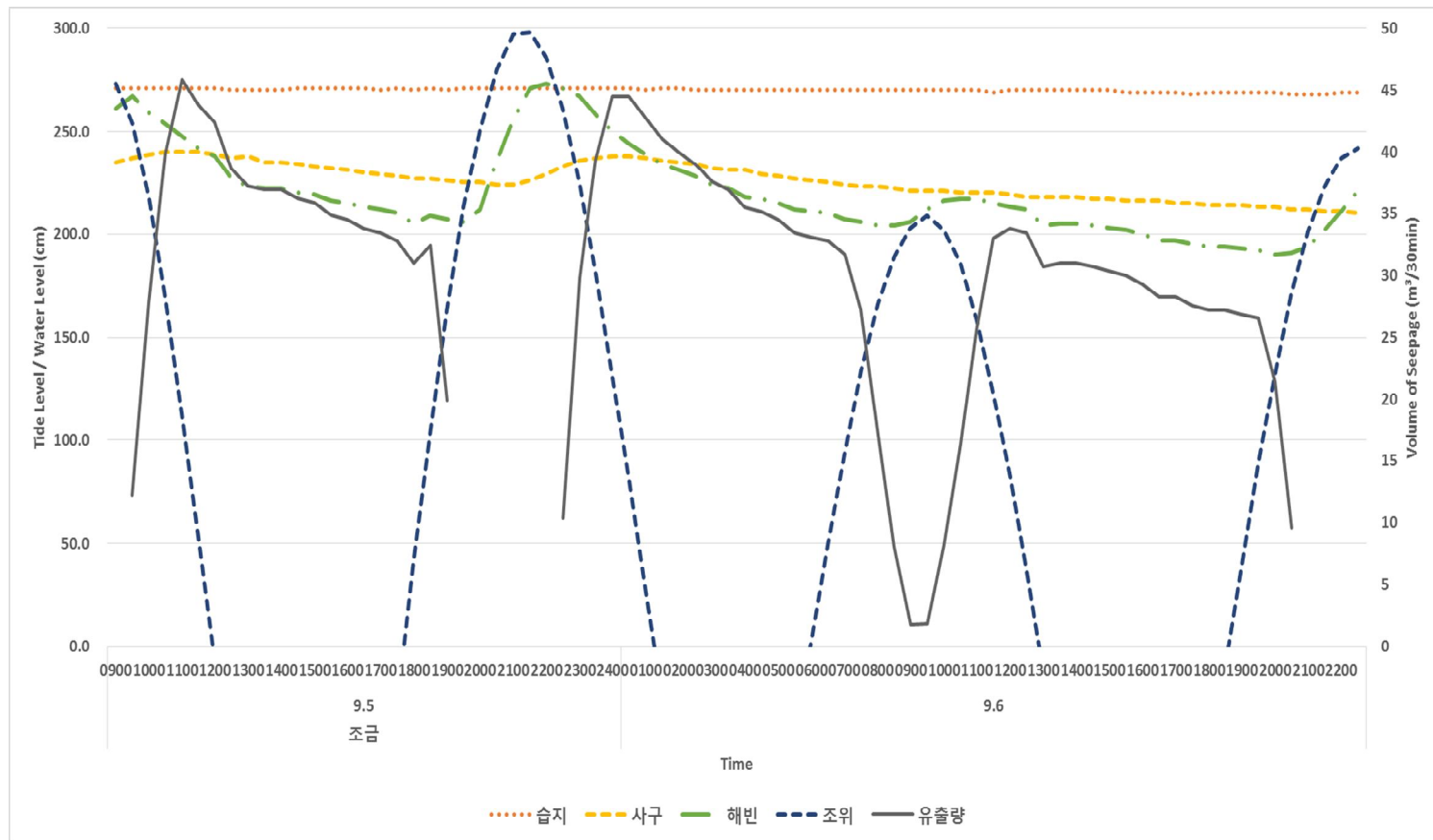


그림 12. 지하수위 및 유출량 변동 (2015.09.05.-06.)

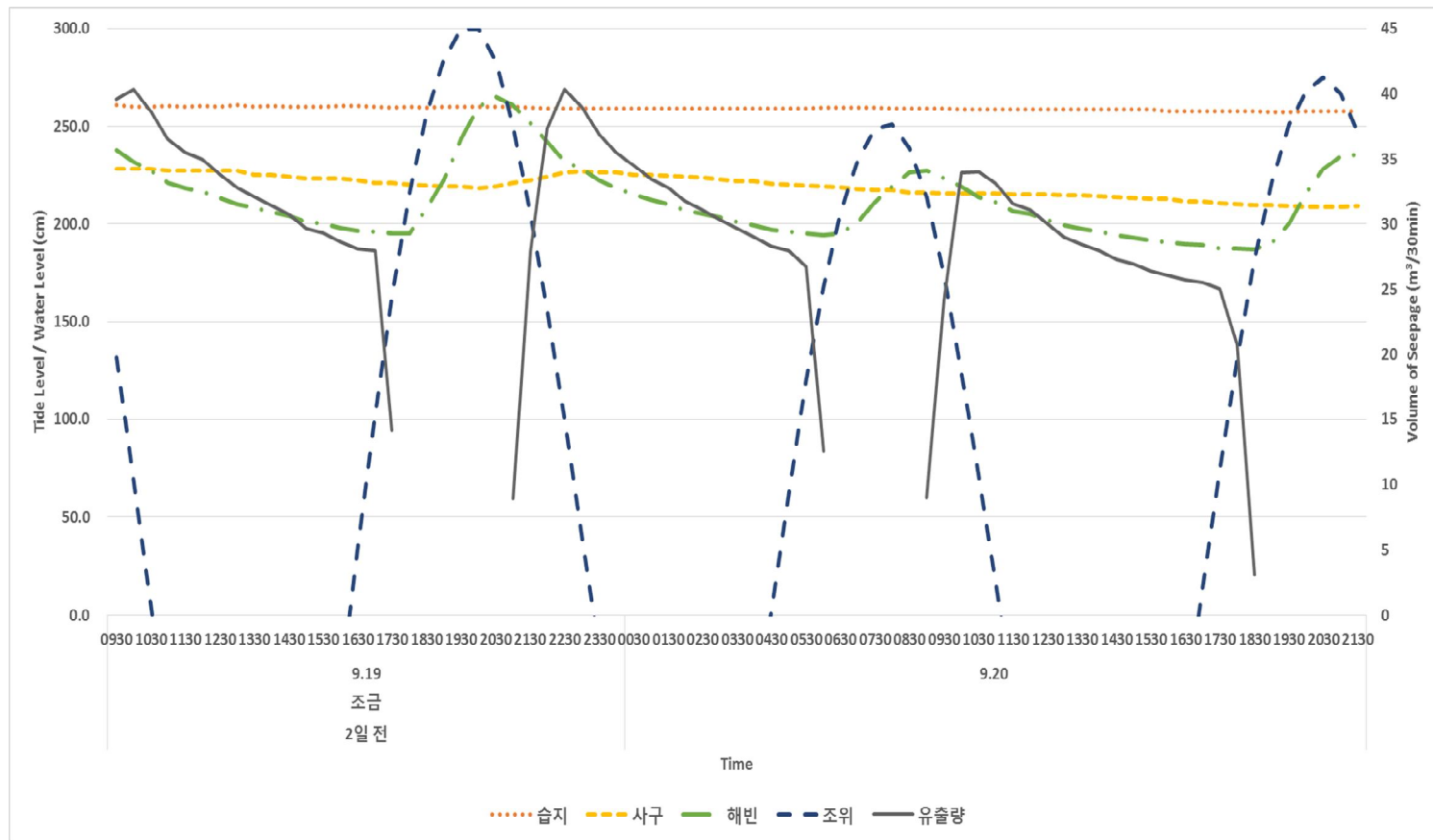


그림 13. 지하수위 및 유출량 변동 (2015.09.19.- 20.)

이를 살펴보면 해빈의 지하수위와 유출량의 경우 고조위 이후에 동일하게 최대값을 나타내고 하강하는 경향을 보여 조석과 비슷한 주기가 뚜렷이 나타난다. 모든 측정 기간에서 해빈 지하수위가 다른 지하수위에 비하여 가장 높게 상승하는 모습을 보이며, 변동계수도 높게 나타난다. 이는 다른 지하수위에 비하여 해빈 지하수위의 변동성이 크다는 것을 의미한다. 또한 사리인 8월 29-30일의 경우 표준편차가 38.12, 변동계수가 0.155인데 반해 조금 시기인 9.5-6일과 9.19-20일에는 각각 18.45-21.66, 0.087-0.098로 낮았다. 이는 조위의 변동성이 큰 사리에 해빈의 지하수위도 크게 변동하였다는 것을 의미한다.

조위 변동이 크게 나타나는 사리에는 사구의 지하수위 변동이 조석주기와 일치하는 모습이 드러나지만, 조위 변동이 작게 나타나는 조금에는 사구의 지하수위 변동이 조석주기와 일치하지 않는다. 특히 9월 19일 고조위가 낮게 나타난 오전 10시 경에 사구의 지하수위는 반응하지 않고 계속 하강하는 모습을 보였다. 즉 사구 지하수위는 조위가 충분히 높을 때에만 반응한다고 볼 수 있다. 변동계수나 표준편차 역시 사리와 조금 모두에서 해빈에 비하여 작게 나타나는데, 이는 조위에 따른 지하수위의 변동성이 해빈보다 사구에서 미약하다는 것을 의미한다.

반면 습지의 지하수위의 경우에는 조위의 변동 정도에 관계없이 일정한 경향을 보인다. 표준편차나 변동계수가 각각 0.8-1.8, 0.003-0.007 정도로 거의 변화가 없으며, 각각의 측정시기 사이에 수위가 변하긴 하였지만 특정한 측정시기 동안에는 대체로 일정하였다. 이는 습지의 지하수위가 조위 변동에 거의 반응하지 않는다는 것을 의미한다. 대신 강수에 영향을 많이 받았을 것으로 예상되는데, 연구지역의 지하수위 측정시기 전후의 강수 사건은 다음 <표 9>와 같다. 이를 보면 8월 28일 첫 번째 측정 일자 직전에 강수량이 23mm를 기록하였다. 자료를 살펴보면 8.29일에 바로 지하수위에 반영되는 것이 아니라, 어느 정도 시차를 두고 9월 5일 측정 시기에 반영된 것으로 추정된다. 이는 사구와 사구습지에서의 지하수위가 강수사건에 대하여 최대 3개월 정도의 시간 지체가 나타나기 때문으로 판단된다(Packham and Willis, 1997).

표 9. 연구지역 강수 일시 및 일 강수량(mm)

일 시	일 강수량(안도 AWS)	일 강수량(만리포 AWS)
2015.08.27.	5.0	2.0
2015.08.28.	23.0	2.0
2015.09.02.	-	3.5
2015.09.03.	1.5	-
2015.09.11.	1.0	1.0

유출량의 경우 해빈과 상당히 유사한 변동 폭과 주기를 보인다. 특히 사리에 평균 유출량이 조금에 비하여 많으며, 변동성 역시 사리에 더욱 컸다. 이는 유출량이 조위의 영향을 직접적으로 받기 때문으로 판단된다. 이를 통해 유출되는 지하수는 내륙 방향에서 온 것이라기보다는 만조 시 해빈 표면에 침투한 염수에서 비롯된 것으로 추론할 수 있다.

이로부터 해안선과의 거리에 따라 지하수위 변동에 영향을 미치는 인자가 달라진다고 판단할 수 있다. 해안선과 가까운 해빈의 지하수위에 비하여 사구와 습지의 지하수위를 비교해 보았을 때, 조석의 영향은 내륙으로 갈수록 지하수위 변동에 미치는 영향력이 적어지게 된다(Horn, 2006). 즉, 해안선에 가까운 곳에서는 지하수위 변동에 미치는 조석의 영향력이 크지만, 내륙에서는 강수가 지하수위 변동에 미치는 영향력이 크다고 판단할 수 있다. 이로부터 해안사구가 내륙 방향으로의 염수 유입을 차단하는 역할을 수행한다는 사실(유근배 등, 2013)을 간접적으로 확인할 수 있다.

또 다른 특징 중 하나는 사구와 해빈의 지하수위가 조위가 상승할 때는 급격히 상승하나 조위가 하강할 때는 천천히 하강한다는 것이다. 이는 지하수위 변동이 이력현상(hysteresis)을 보이는 것으로 파악할 수 있다(Nielsen, 1990; Horn, 2002). 또한 조위의 상승 국면에서는 지하수위가 조위보다 낮는데, 이는 이 시기에 지하수 유출 지점이 해수면과 일치하여 움직인다는 것을 의미한다. 조위의 하강 국면에서는 지하수위가 조위보다 높는데, 이는 이 시기에 지하수 유출 지점이 해수면과 분리되어 지하수위와 조위의 하강속도가 달라진다는 것을 의미한다(Turner, 1993). 이러한 차이가 유출량의 이력현상을 유발하였다고 판단된다.

2) 지하수위와 유출량 변동성의 시간 지체

해빈, 사구, 습지의 지하수위 및 추정된 유출량 자료를 조위 자료에 대하여 각각 교차상관분석(CCF)을 실시하였다(그림 14-17). 먼저 해빈의 지하수위는 조위 변동에 대하여 사리에는 약 1시간, 조금에는 약 2시간이 지체되었다. 사구의 지하수위는 사리에는 약 3시간, 조금에는 약 4-5시간이 지체되었다. 습지 지하수위의 경우에는 8월 30일을 제외하면 유의미한 상관관계가 나타나지 않으며, 8월 30일 또한 표본이 적어 상관관계가 높게 나타난 결과를 온전히 신뢰하기는 어렵다. 유출량의 경우에는 사리에 약 3.5-4.5시간, 조금에는 약 5.5시간 정도 지체되었다.

해빈의 지하수위와 사구의 지하수위를 비교하였을 때, 해안선에 가까운 해빈의 지하수위가 조위 변동에 보다 빨리 반응하였다. 상관계수의 절대값을 살펴보면, 해빈의 경우에 8월 29-30일에서 0.811의 높은 값을 보이는 반면 사구의 경우 8월 29-30일에서 최대값이 0.741을 보였다. 이로부터 해안선에서 가까울수록 지하수위의 변동에 대한 조석의 영향이 크게 나타난다는 사실을 확인할 수 있다(Horn, 2006). 또한 해빈과 사구의 경우 상관계수의 최대값이 사리인 8월 29-30일에 비해 조금인 9월 5-6에 각각 0.592와 0.416, 19-20일에서 각각 0.734와 0.327로 낮았다. 이로부터 조위의 변동성이 큰 사리에 조석의 영향력이 더욱 크게 나타난다는 사실을 확인할 수 있다. 이는 상대적으로 조위 변동이 적은 조금에 시간의 지체가 늘어났다는 분석 결과와 더불어 조위의 변동성이 클 때 지하수위가 더 빨리 반응한다고 결론지을 수 있다.

유출량의 경우 전반적으로 지하수위보다 시간이 더 지체되었는데, 이는 상승한 지하수위가 바다 방향으로 유출되기까지 이동하는 시간이 포함되어 있기 때문으로 보인다. 따라서 조금 시기에는 유출량이 거의 간조에 이르러 최대값을 보였다.

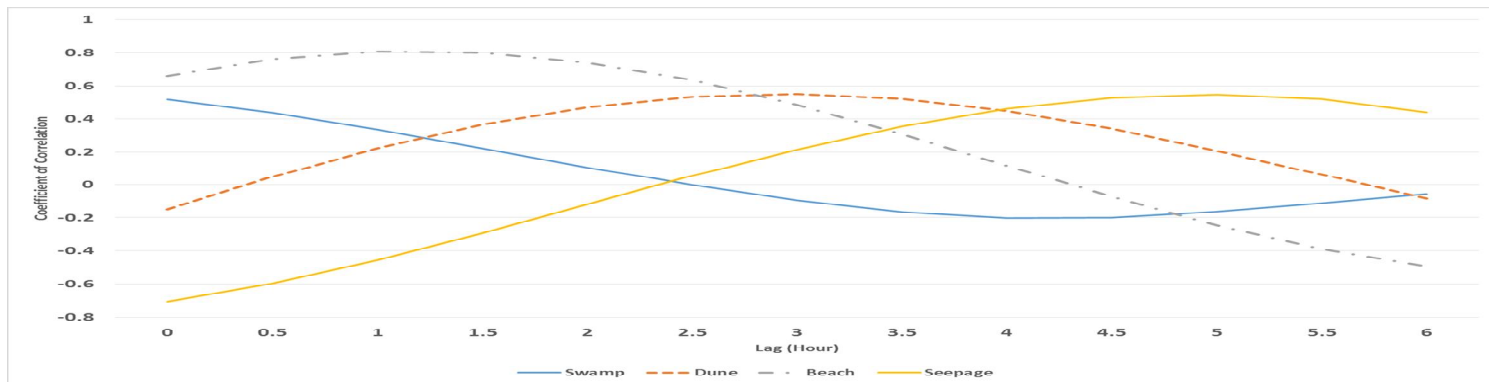


그림 14. 교차상관분석 (2015.08.29.)

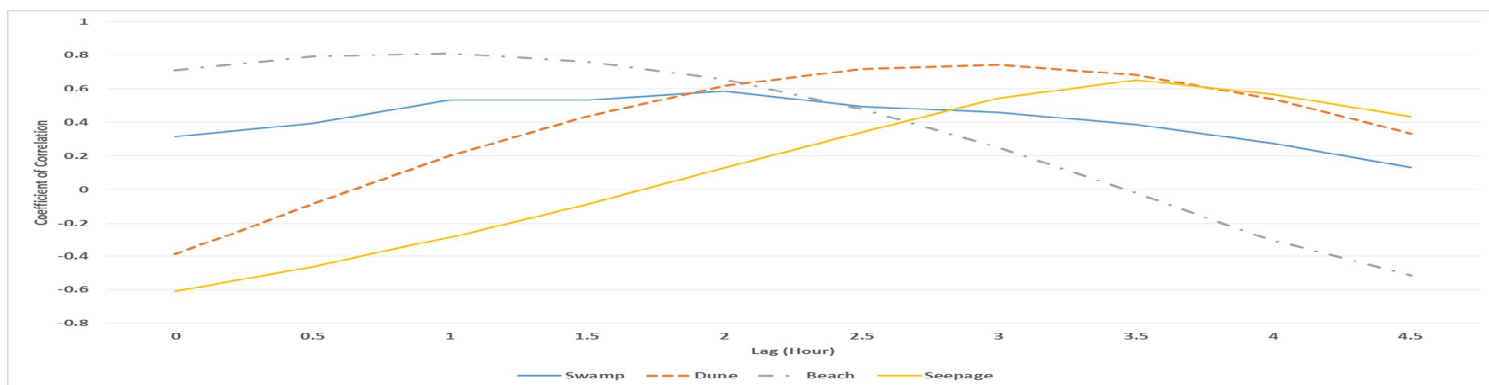


그림 15. 교차상관분석 (2015.08.30.)

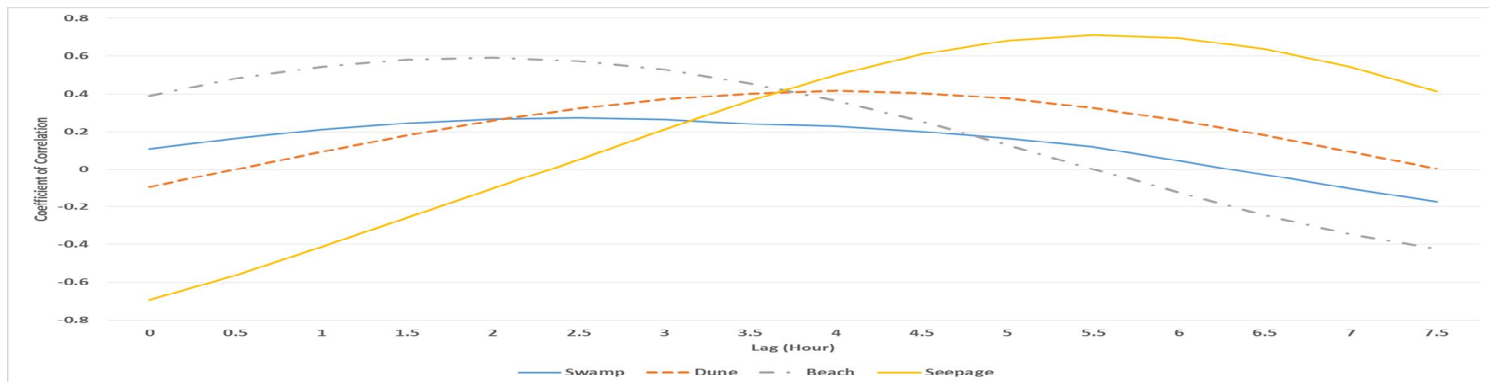


그림 16. 교차상관분석 (2015.09.05.-06.)

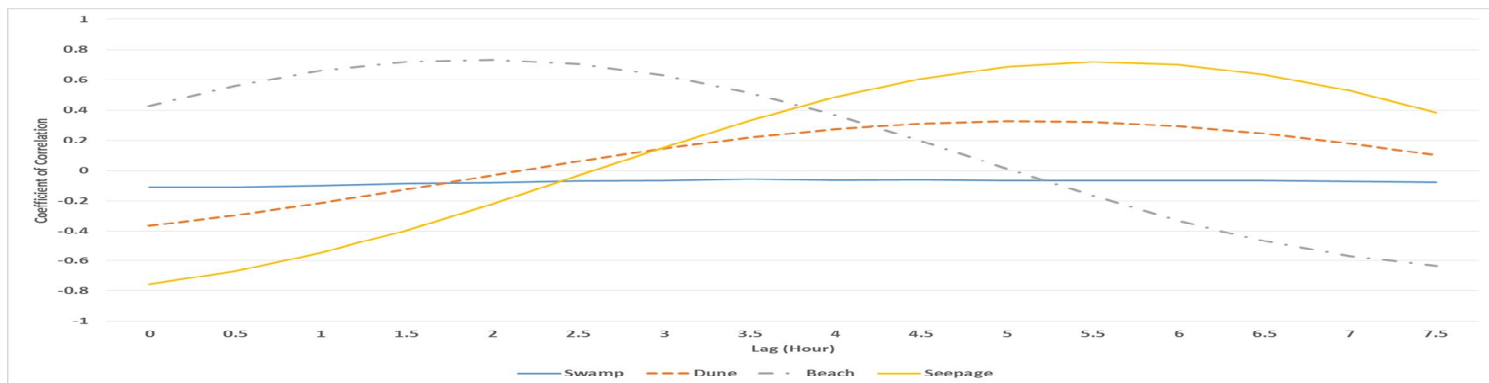


그림 17. 교차상관분석 (2015.09.19.-20.)

3. 연구지역의 지형변화

1) 단면 변화

먼저 측량지역 남서쪽 하단에 위치(측량 기준에서 187도 방향으로 36.29m 떨어진 곳에 위치)한 고정된 계단 통로의 좌표를 제작한 DEM(그림 18-19)마다 비교하여 오차를 측정하였다.

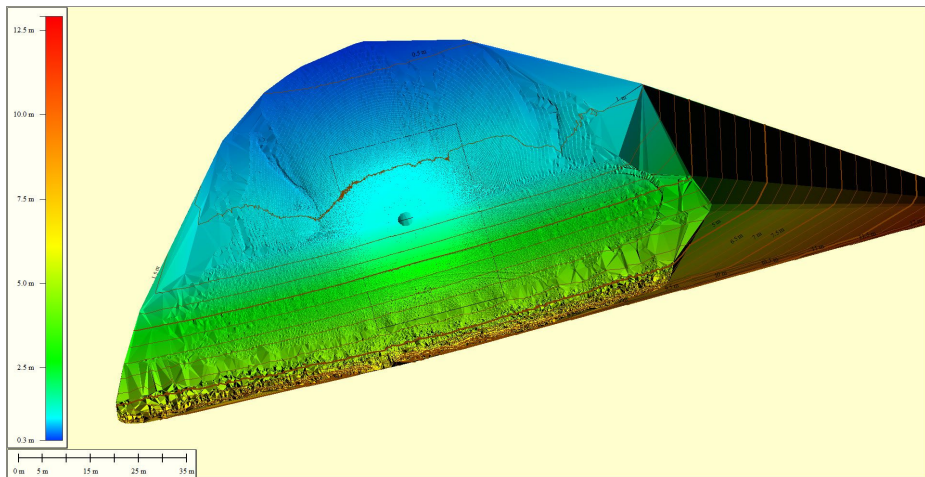


그림 18. 연구지역 LiDAR 기반 2차원 DEM (2015.9.19. 15시 측량)

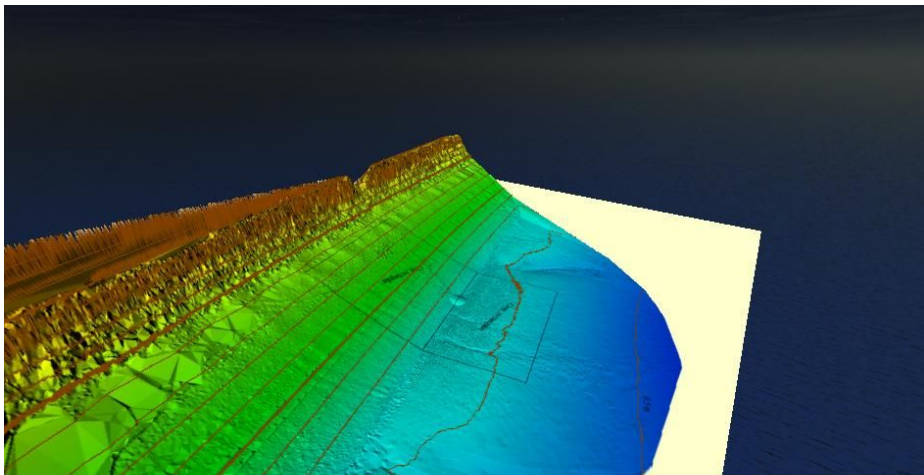


그림 19. 연구지역 LiDAR 기반 3차원 DEM (2015.9.19. 15시 측량)

그 결과 8월 29일에 측량한 DEM에서는 9시와 9시 30분에 측량된 고도 좌표와 10시 이후에 측량된 고도 좌표 간에 3.8cm의 차이가 발생하였다. 또한 10시 30분에 측량한 DEM은 고도 10cm의 차이가 발생하였다. 반면 10시 30분을 제외한 나머지 10시 이후의 DEM은 모두 3mm 이내의 오차를 보였다. 9월 19일에 측량한 DEM에서는 11시 30분과 12시에 측량된 고도 좌표와 12시 30분 이후에 측량한 고도 좌표 간에 각각 5mm, 1.1cm의 차이가 발생하였다. 12시 30분 이후에 측량한 DEM은 모두 2mm 이내의 오차를 보였다. 이용한 장비의 3차원 정확도는 40m에서 3mm, 각도는 수직 및 수평 8도, 측정 정확도(Range accuracy)는 전체 범위에서 1.2mm + 10ppm 이다. 따라서 8월 29일 9시, 9시 30분, 10시 30분 측량 자료와 9월 19일 11시 30분, 12시에 측량한 자료는 오차 범위를 초과하는 측량 오차가 발생하였다고 판단하여 분석 대상에서 제외하였다. 본 연구에서 분석한 측량 자료는 다음 표와 같다(표 10).

표 10. 지상 LiDAR 측량 자료 중 분석 대상 자료

2015.08.29.	비고	2015.09.19.	비고
0900	오차 3.8cm	1130	오차 5mm
0930	오차 3.8cm	1200	오차 1.1cm
1000	1008 간조	1230	-
1030	오차 10cm	1300	-
1100	-	1330	1325 간조
1130	-	1400	-
	-	1430	-
	-	1500	-
-	-	1530	-

설정한 격자 내에서 격자의 동쪽 변으로부터 10m 떨어진 가상의 직선을 설정하여 해당 직선에서의 단면을 측량 시점마다 비교하였다. 이를 지하수 유출지점을 중심으로 확대하여 그래프에 도시하였으며(그림 20-21), 시점 별 고도 및 경사도 변화량을 다음 표에 제시하였다(표 11-12).

표 11. 2015년 8월 29일 단면 변화

측량 일시	시점 고도(m)	종점 고도(m)	경사도(°)	유출지점 하부(°)	유출지점 상부(°)
1000	0.902	4.312	5.02	1.11	7.82
1100	0.887	4.295	5.02	1.13	7.86
1130	0.881	4.289	5.02	1.13	7.87

표 12. 2015년 9월 19일 단면 변화

측량 일시	시점 고도(m)	종점 고도(m)	경사도(°)	유출지점 하부(°)	유출지점 상부(°)
1230	0.882	4.349	5.11	0.86	8.54
1300	0.885	4.361	5.12	0.84	8.52
1330	0.879	4.359	5.13	0.89	8.55
1400	0.881	4.355	5.12	0.86	8.53
1430	0.88	4.363	5.13	0.89	8.55
1500	0.88	4.363	5.13	0.89	8.57
1530	0.881	4.367	5.14	0.9	8.54

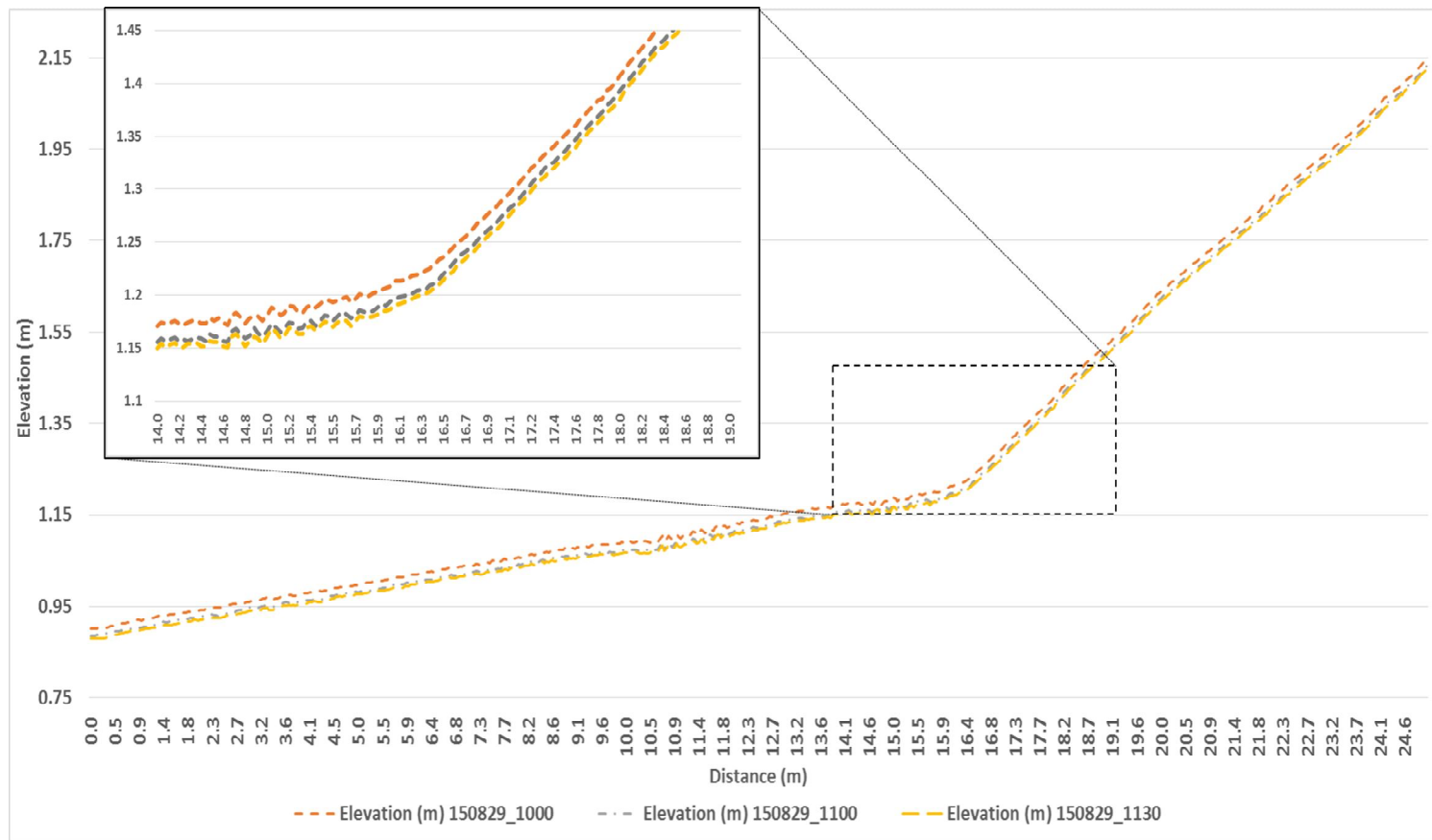


그림 20. 연구 지역 단면도 (2015.08.29.)

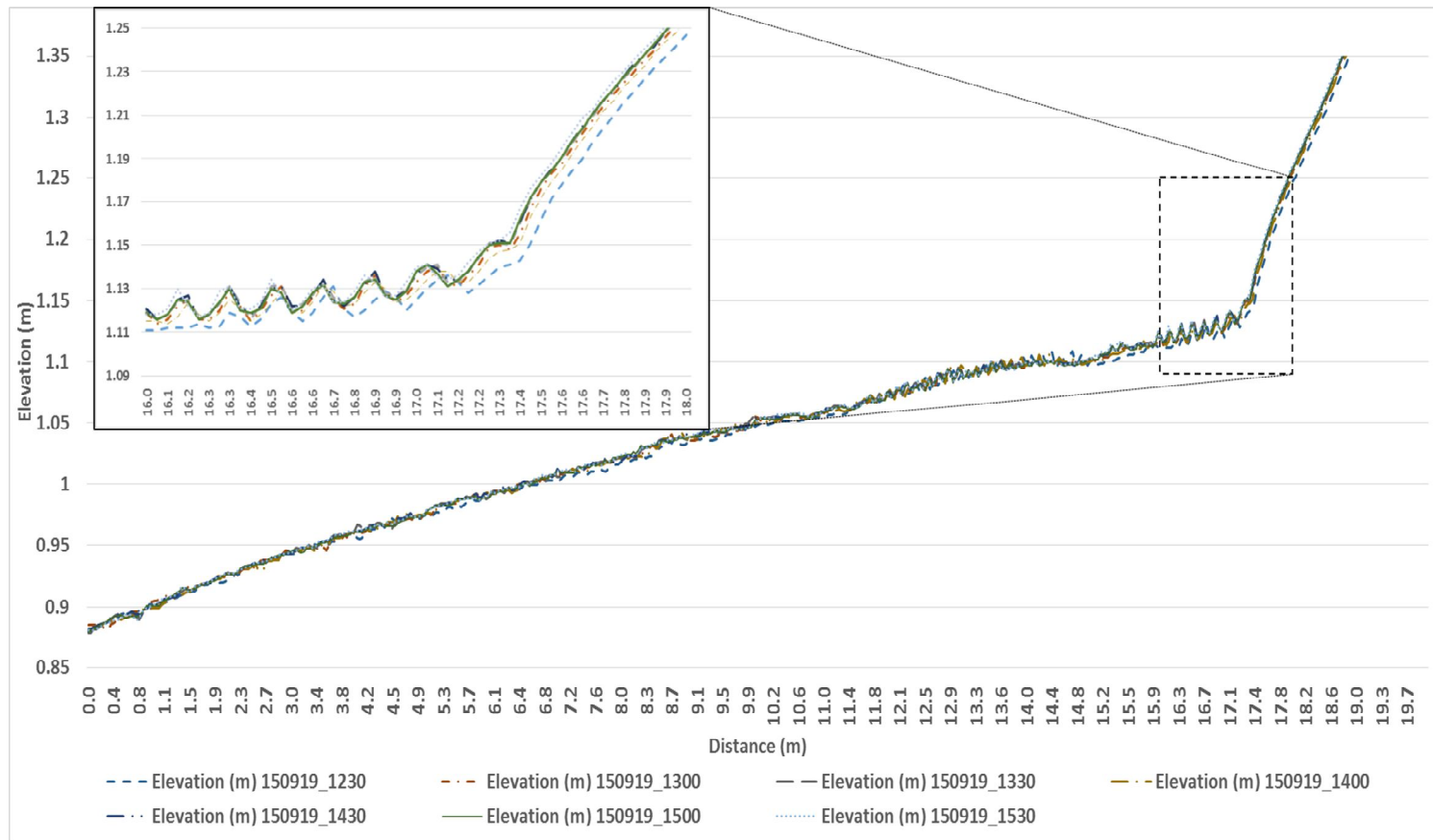


그림 21. 연구 지역 단면도 (2015.09.19.)

이를 살펴보면 8월 29일 사리와 9월 19일 조금을 통틀어 시점과 종점의 고도가 간조 시점 이후 하강하는 경향을 보인다. 반면 9월 19일 조금에서 간조 시점 이전에는 1.2cm 정도 상승하였다. 전반적인 경사도는 큰 변화가 없으나, 유출면 하부 경사도와 유출면 상부 경사가 8월 29일 사리에 각각 0.02° , 0.05° , 9월 19일 조금에 각각 0.04° , 0° 로 급해지는 경향을 보인다. 하지만 간조 시점 이전으로 한정하면 9월 19일 조금의 측량 자료에서 유출지점 하부의 경사가 0.02° , 상부의 경사가 0.02° 정도 완만해졌다. 또한 측량 시점의 간격 별로 변화량을 살펴보면, 간조 시점인 8월 29일 10시 8분과 9월 19일 13시 25분을 중심으로 고도와 경사의 변화량이 다른 시간대에 비하여 크게 나타났다.

사리와 조금의 고도변화량을 비교해보면, 사리에는 시점에서 2.1cm, 종점에서 2.3cm이지만 조금에는 각각 0.1cm, 1.8cm로 조금에 더 변화량이 작았다. 간조 시점 이후로만 한정하여도 조금에 각각 0.2cm, 0.8cm로 여전히 사리에 크게 변하였다. 특히 사리에는 시점, 종점 고도의 변화가 동일한 시간 규모에서 더 크게 나타났다. 지하수 유출지점의 고도도 사리에는 눈에 띄게 하강하나 조금에는 큰 변화가 없는 모습을 보인다. 그리고 지하수 유출지점을 기준으로 유출면 하부의 경사도가 상부의 그것보다 훨씬 완만하였다. 사리에서는 시간이 지남에 따라 유출지점 상부와 하부의 기울기 차이가 강화되는 것으로 나타났다.

2) 부피와 층후 변화

설정한 격자 내의 부피와 층후의 변화량을 계산하여 측량 시점별로 비교하였다(표 13-14). 부피 변화의 오차 범위는 8월 29일에는 지하수 유출 지점 하부 약 1.35m^3 , 상부 약 1.81m^3 , 전체 약 3.165m^3 이며, 9월 19일에는 지하수 유출 지점 하부 약 1.43m^3 , 상부 약 1.77m^3 , 전체 약 3.207m^3 이다(그림 22-23). 층후 변화의 오차 범위는 측량 장비의 제원에 따라 3mm이다. <표 13>에서 8월 29일 간조 시점 직후 1시간 단위의 변화량을 표현하였기 때문에 <표 14>의 9월 19일 조금 역시 간조 시점 직후 변화량을 1시간 단위로 표현하였다. 층후 변화의 경우 -값은 상승, +값은 하강을 의미하며 부피 변화량의 경우 -값이 퇴적, +값이 침식을 의미한다.

표 13. 8월 29일 부피 및 층후 변화량

측량 일시	전체 변화량			유출지점 하부 변화량			유출지점 상부 변화량		
	침식량(m³)	퇴적량(m³)	층후(mm)	침식량(m³)	퇴적량(m³)	층후(mm)	침식량(m³)	퇴적량(m³)	층후(mm)
1000	16.202		15.4	6.961		15.5	9.241		15.3
-1100	16.205	0.003		6.961	-		9.245	0.004	
1100	6.390		6.1	2.560		5.7	3.830		6.3
-1130	6.398	0.008		2.563	0.003		3.835	0.005	
누적 변화량	22.591		21.4	9.521		21.1	13.071		21.6
	22.603	0.011		9.523	0.003		13.080	0.009	

표 14. 9월 19일 부피 및 층후 변화량

측량 일시	전체 변화량			유출지점 하부 변화량			유출지점 상부 변화량		
	침식량(m³)	퇴적량(m³)	층후(mm)	침식량(m³)	퇴적량(m³)	층후(mm)	침식량(m³)	퇴적량(m³)	층후(mm)
1230	-5.924		-5.5	-1.105		-2.3	-4.819		-8.1
-1300	0.298	6.222		0.255	1.360		0.043	4.862	
1300	-2.011		-1.9	-0.662		-1.4	-1.349		-2.3
-1330	0.077	2.088		0.043	0.705		0.034	1.383	
1330	-0.149		-0.1	-0.002		0	-0.148		-0.03
-1430	3.647	3.797		1.104	1.106		2.543	2.691	
1430	0.366		0.3	0.328		0.7	0.038		0.06
-1500	0.588	0.222		0.384	0.056		0.204	0.166	
1500	-2.087		-2.0	-0.497		-1.0	-1.590		-2.7
-1530	0.143	2.230		0.105	0.602		0.378	1.628	
누적 변화량	-9.806		-9.2	-1.939		-4.1	-7.867		-13.3
	4.753	14.560		1.891	3.830		3.203	10.729	

설정한 격자 내의 부피량 변화는 8월 29일 사리 때 누적 변화량 22.591m³, 9월 19일 조금에 9.806m³로 사리에 더 크게 나타났다. 간조 시점 이후로 한정하여도 조금의 누적 변화량은 1.870m³에 불과하였다. 전반적으로 사리에는 오차범위를 넘는 침식이 발생하였으나 조금에는 유의미하지 않은 퇴적이 발생한 것으로 확인되었다. 충후 역시 9월 19일 조금에는 누적 변화가 9.2mm이지만 30분 단위로는 12시 30분에서 13시까지를 제외하면 3mm 이하의 변화량을 보여 오차 범위 이내로 나타났다.

좀 더 자세히 살펴보면, 8월 29일 사리에는 간조 시점을 중심으로 발생한 변화량이 이후에 발생한 변화량보다 약 3배 크다. 9월 19일 조금에는 간조 직전 시점을 제외하고는 대부분의 변화량이 오차범위 이내여서 유의미하지 않다. 한편 유출지점을 중심으로 하부 해빈에서의 변화량이 상대적으로 상부 해빈보다 적은 것을 확인할 수 있다. 경향성 자체는 9월 19일 조금에서 간조 시점을 전후로 변화의 방향이 달라졌다. 간조 이전에는 퇴적량과 충후 변화가 점차 감소하다가 간조가 지나면서 다시 증가하는 모습을 보인다. 8월 29일 사리 역시 간조 시점 이후에 침식량과 충후 변화가 감소하였다. 다만 전체적으로는 8월 29일 사리에는 전반적으로 침식 경향이 나타나며 9월 19일 조금에는 전반적으로 오차범위 안팎의 퇴적 경향이 나타났음을 확인하였다.

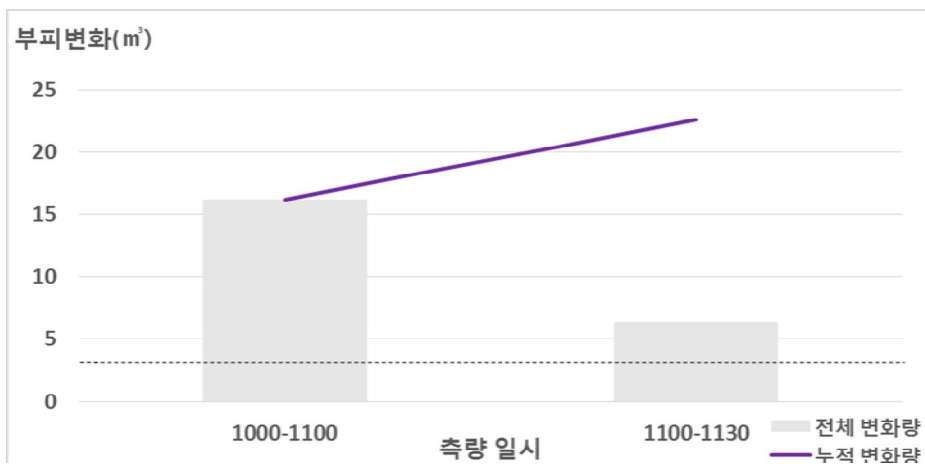


그림 22. 격자 내 부피 변화량 (2015.08.29.)

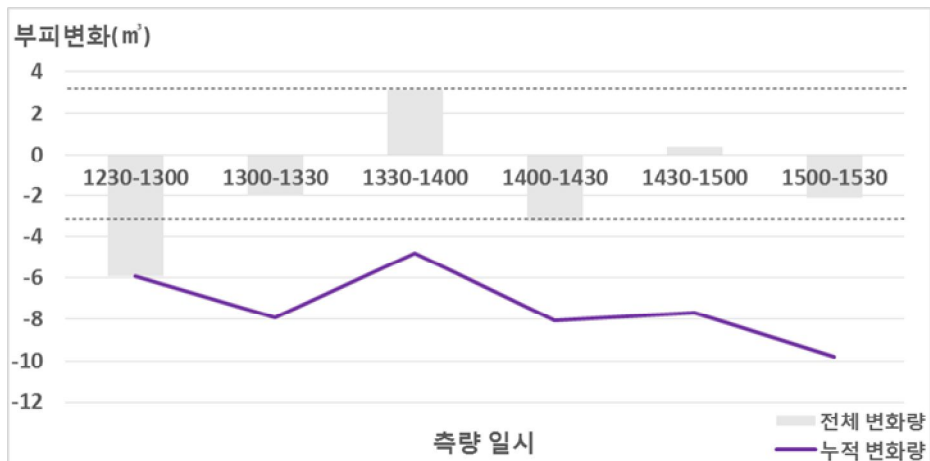


그림 23. 격자 내 부피 변화량 (2015.09.19.)

요약하면, 8월 29일 사리 때는 9월 19일 조금보다 고도, 기울기, 부피 및 층후 등의 지형변화가 더 크게 나타났다. 사리에는 침식이 증가하고 고도가 하강하는 모습을 관측할 수 있으나 조금에는 일부 시점에서의 지형변화를 제외하고는 유의미한 변화량이 관측되지 않았다. 지하수 유출 지점을 중심으로는 하부 해빈에서의 경사가 상부 해빈보다 완만함을 확인하였으나 지형변화량은 사리와 조금에서 모두 적게 나타났다. 이는 지하수 유출로 인한 퇴적물의 운반보다 완만한 경사에서 오는 안정성이 더 크기 때문으로 판단된다.

하지만 경향성은 두 시기에서 어느 정도 일치하는데, 9월 19일 조금에 간조 시점을 기준으로 변화의 방향이 달라지는 모습을 확인하였다. 8월 29일 사리에 간조 시점 이후 나타난 변화의 방향이 9월 19일 조금의 동일한 시기와 일치하는 것으로 보아 8월 29일 또한 간조 시점을 기준으로 변화의 방향이 달라졌다고 추정할 수 있다. 즉, 유출지점 상부와 하부의 기울기는 모두 간조 시점 이전에는 완만해지다가 이후에는 급격해지는 모습을 보였다. 또한 변화량의 경향성 자체는 동일하게 두 시기에서 각각 침식량과 퇴적량이 간조를 지나면서 점차 감소하였음을 확인하였다. 한편 8월 29일 사리와 9월 19일 조금 사이의 3주 동안 약 0.853m^3 정도가 퇴적된 것으로 나타났다.

IV. 지하수 유출과 해빈 미지형변화의 관계

1. 부피와 층후 변화

추정한 지하수 유출량을 설정한 격자 내에서 발생한 부피 변화량과 연동시켜 그래프로 표현하였다(그림 24-25). 해석의 편의를 위하여 9월 19일 조금의 경우 간조 시점을 기준으로 스케일을 1시간 단위로 통합하였다.

이를 살펴보면 8월 29일 사리에는 지하수 유출량에 비례하여 지형변화가 발생한다고 판단된다. 즉, 유출량이 많을수록 지하수 유출 및 유출된 지하수의 흐름으로 인해 퇴적물이 바다 방향으로 운반되는 것으로 보인다. 측량 결과 유출지점 상부에서 더 많은 부피 및 층후 변화량이 나타나는데, 이는 지하수 유출지점으로부터의 침식이 상부 해빈의 경사도를 급하게 만들어 상부 해빈의 안정성을 감소시켜 침식이 일어나기 쉽게 만들기 때문인 것으로 보인다(Owoputi and Stolte, 2001). 뿐만 아니라 상부 지역에서는 지하수위가 하강함에 따라 퇴적물이 건조해져 수분함량이 감소하는데, 이는 상부 해빈에 직접적인 침식 작용이 일어나지 않았음에도 불구하고 부피의 감소를 유발하게 된다(Mitchell, 1991; Fredlund and Houston, 2013). 반면 하부 해빈의 경우 세립질의 퇴적물과 완만한 경사에서 오는 안정성의 증가로 인해 상대적으로 부피 및 층후 변화가 적게 나타난 것으로 판단된다(Nielsen, 1997). 이로 인해 해빈이 전반적으로 침식되는 경향을 보인다.

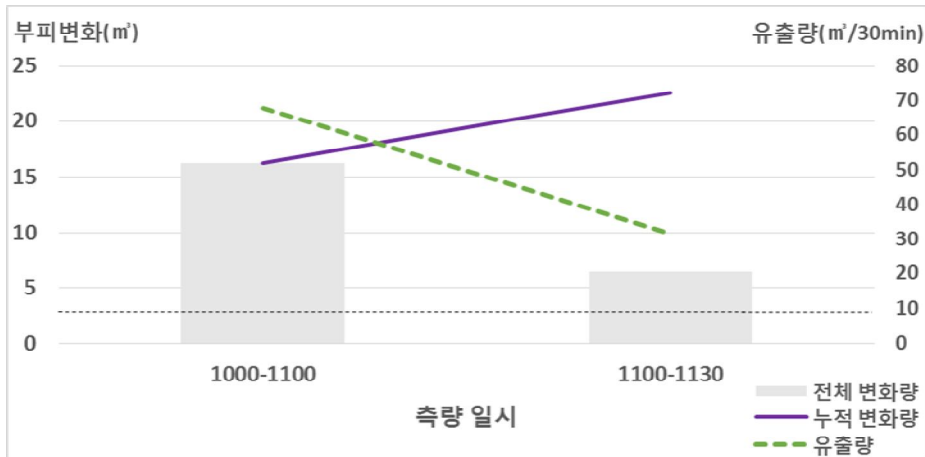


그림 24. 부피 및 유출량 변화 (2015.08.29.)

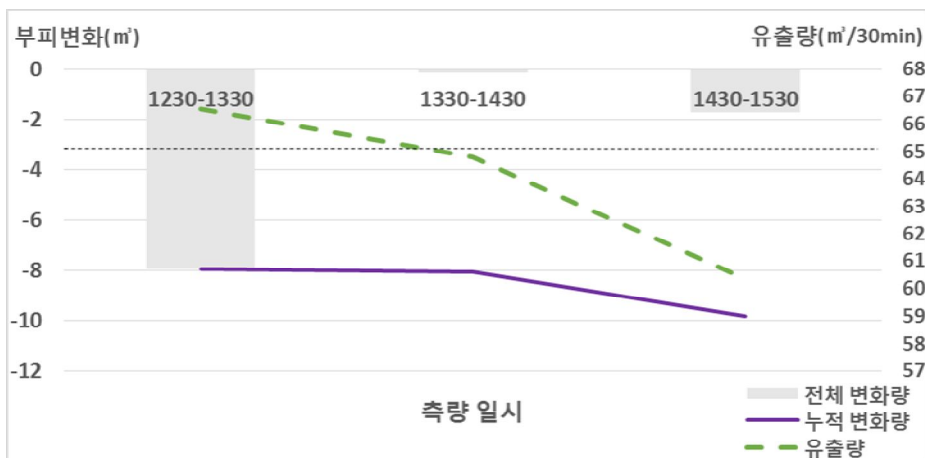


그림 25. 부피 및 유출량 변화 (2015.09.19.)

9월 19일 조금에는 유출량에 무관하게 유의미한 지형변화가 나타나지 않았다. 특히 사리와 조금 시기에 추정된 기간 동안의 유출량은 변화율의 정도는 차이가 존재하지만 유출량 자체는 큰 차이가 있다고 보기 어렵다. 예를 들어 8월 29일 오전 11시부터 30분 간 유출된 31.350m³의 지하수와 9월 19일 오후 2시부터 30분 간 유출된 30.684m³의 지하수 양은 큰 차이가 없으나, 지형 변화량은 전자에 유의미한 침식이 발생한 반면 후자에는 유의미하지 않은 퇴적이 발생하였다. 따

라서 사리와 조금 사이에 이러한 지형변화량의 차이는 지형변화에 영향을 미치는 요인이 지하수 유출 이외에는 없는 상황에서 조위 변동성이 보다 큰 사리에 측정 시기 전후를 포함한 누적 유출량이 많기 때문으로 판단된다. 즉, 누적 유출량이 적은 조금에는 유의미한 지형변화가 발생하지 않은 것이다.

하지만 간조를 중심으로 지형변화량이 감소하였다가 다시 증가하는 경향성의 변화는 뚜렷하게 나타난다. 사리와 조금 모두 간조 이후 경향성이 동일한 것으로 미루어 볼 때, 사리 역시 간조를 기준으로 경향성이 변화하였을 것으로 판단할 수 있다. 유출량이 최대가 되는 시점은 간조 시점 이전 1시간 이내에 발생하였으므로 유출량 변동의 경향성이 곧 지형변화의 경향성을 결정하는 것으로 보인다.

연구지역을 살펴보면 지하수 유출지점에서 해빈 하부로 미약한 릿지(ridge)가 형성되어 있다. 때문에 유출된 지하수는 바다 방향으로 고르게 흐르는 대신 소규모로 형성된 갯골을 중심으로 흘러나간다. 따라서 지하수의 유출로 인해 발생하는 지형변화는 지하수 유출지점 근처에서 나타나는 경우 이외에도 갯골을 중심으로 나타날 수 있을 것으로 보인다. 이에 따라 설정한 격자 내부에서 갯골 주변과 지하수 유출지점 주변의 구역을 재설정하여 부피변화를 비교하였다(그림 26-27). 그 결과 사리와 조금에 나타난 전체적인 경향성은 크게 달라지지 않았다. 즉, 사리에는 갯골과 유출 지점 주변으로 침식 경향성이 나타나며, 조금에는 갯골과 유출 지점 주변으로도 유의미한 지형변화가 나타나지는 않았지만 경향성 자체는 전체적으로 동일하게 간조 시점을 중심으로 변화하는 모습을 보였다.

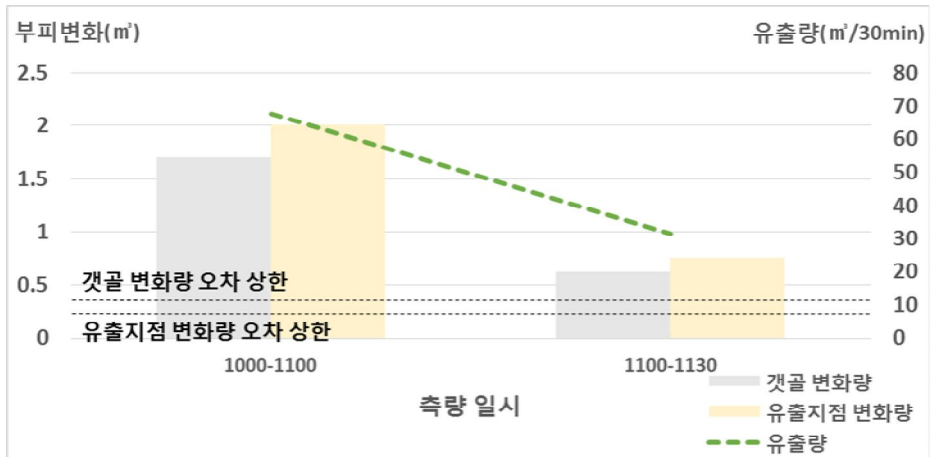


그림 26. 갯골 및 유출지점 주변 부피 변화량 (2015.08.29.)

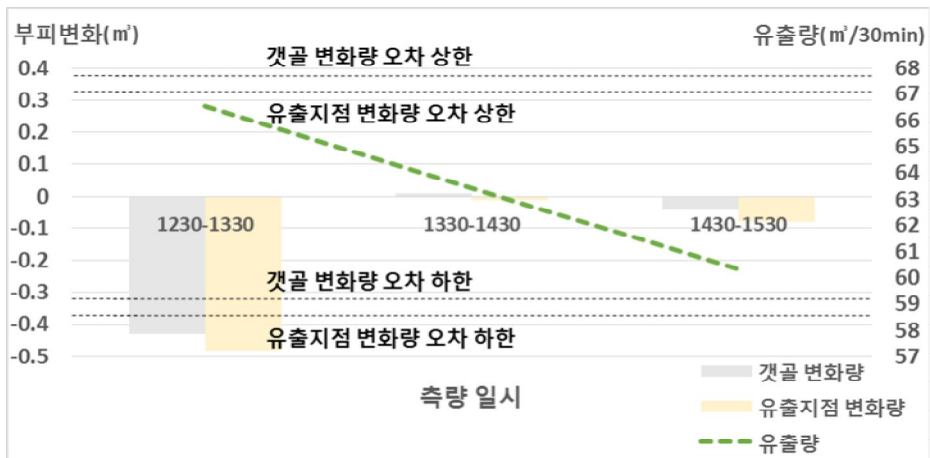


그림 27. 갯골 및 유출지점 주변 부피 변화량 (2015.09.19.)

결론적으로 유출량이 비슷한 두 시기를 비교하였을 때, 8월 29일 사리에는 유의미한 침식이 나타났으며 9월 19일 조금에는 유의미한 변화가 나타나지 않았다. 그러나 두 시기 모두 간조 시점을 중심으로 지형 변화의 경향성이 전환되는 모습이 뚜렷하게 나타났다. 이로부터 가능한 해석은 첫째, 사리 때는 지형변화를 일으키기에 충분한 지하수 유출이 일어났던 반면 조금에는 그렇지 못하다는 것이다. 이는 측량 시점 내에서는 유출량에 큰 차이가 없지만, 지하수위 측정 시기 전체를 볼 때 사

리 때의 누적 유출량이 더 많다는 것에 기인한다. 따라서 유출된 지하수가 퇴적물을 운반시킬 수 있을 정도로 충분한 힘을 가할 때에만 침식이 일어난다는 해석이 가능하다. 이는 곧 지하수의 유출량이 특정한 임계값을 넘을 때 해빈 지형변화를 유발한다는 것을 의미한다. 임계값을 넘지 못하는 경우에는 지하수 유출이 유발하는 침식작용보다 해빈 표면의 안정성이 커서(Owoputi and Stolte, 2001) 침식이 일어나지 않는 것으로 보인다. 하지만 이에 대해서는 본 연구에서 측량한 시기만으로는 명백히 밝힐 수 없으며, 향후 추가적인 데이터의 획득과 더불어 모델링을 통해 임계값의 정확한 추정이나 다른 변수에 따른 임계값 수치 변동에 관한 연구가 필요하다고 사료된다. 둘째, 사리와 조금의 지형변화는 유출량이 최대값을 보이는 시점을 기준으로 다른 방향으로 발생한다는 것이다. 간조와 유출량의 최대 시점은 거의 일치하기 때문에, 지형변화를 유발하는 유출량의 증감이 반대가 되면서 이로 인한 지형변화도 그 시점을 기준으로 반대 방향으로 발생한다고 판단할 수 있다.

이를 연구지역 해빈 지형 전반으로 확대해보면, 각각의 측량 시기 사이에서는 퇴적 경향이 나타나고 기울기가 유출지점 상부에서 급해진 것은 국내 서해안의 해빈에서 Shepard(1950)이 제시한 해빈의 계절순환 양상(Beach cycle)에 따라 여름철에 퇴적 경향이 나타나는 것과 일치한다고 판단된다(추용식 등, 1996). 하지만 지하수 유출 요인으로 제한하여 해빈 지형에 미친 영향만을 살펴볼 때, 충분한 지하수 유출이 있을 때는 이러한 경향과 반대로 침식이 우세한 것으로 나타난다. 즉, 지하수 유출은 여름철 퇴적이 우세한 지형변화 경향에 반대되는 침식작용을 수행하며, 파랑에 의한 퇴적 작용이 이를 상쇄시킨다고 해석할 수 있다.

2. 기울기 변화

추정한 지하수 유출량과 설정한 격자 내 가상의 직선상의 단면을 비교한 표는 다음과 같다(표 11-12).

표 11. 2015년 8월 29일 단면 변화

측량 일시	시점 고도(m)	종점 고도(m)	경사도(°)	유출지점 하부(°)	유출지점 상부(°)	유출량 (m ³ /30min)
1000	0.902	4.312	5.02	1.11	7.82	34.144
1100	0.887	4.295	5.02	1.13	7.86	31.661
1130	0.881	4.289	5.02	1.13	7.87	31.350

표 12. 2015년 9월 19일 단면 변화

측량 일시	시점 고도(m)	종점 고도(m)	경사도 (°)	유출지점 하부(°)	유출지점 상부(°)	유출량 (m ³ /30min)
1230	0.882	4.349	5.11	0.86	8.54	33.787
1300	0.885	4.361	5.12	0.84	8.52	32.753
1330	0.879	4.359	5.13	0.89	8.55	32.063
1400	0.881	4.355	5.12	0.86	8.53	31.374
1430	0.88	4.363	5.13	0.89	8.55	30.684
1500	0.88	4.363	5.13	0.89	8.57	29.650
1530	0.881	4.367	5.14	0.9	8.54	28.616

부피 및 층후 변화와 마찬가지로 8월 29일 사리에는 유출량에 비례하여 고도 변화가 발생했다. 그러나 경사도의 경우 유출 지점의 상부 및 하부 경사도가 약간 급해진 것을 제외하면 큰 변화는 나타나지 않았다. 시점 고도 변화는 사리에 침식이 우세해지면서 고도가 하강하였다고 판단할 수 있다. 종점 고도의 변화는 간조 이후 지하수위 하강과 표면 건조에 따른 부피 감소의 결과로 추정된다(Mitchell, 1991; Fredlund and Houston, 2013). 경사도의 경우에는 유출 지점 상부의 경우 유출 지점 하부가 침식되면서 유출지점 고도의 하강으로 인해 경사가 급해진 것으로 보인다. 유출 지점 하부의 경사도가 미약하게 상승한 것은 상부로부터 침식된 퇴적물이 하부에 퇴적됨과 동시에 바다 방

향으로는 침식이 계속되면서 발생한 것으로 판단된다.

9월 19일 조금의 경우에는 부피 및 층후 변화와 마찬가지로 간조 시점을 중심으로 고도와 기울기의 변화 방향이 전환되었다. 유출지점 하부 및 상부의 고도는 간조 시점 이전에는 상승하였으나 이후에는 하강하는 모습을 보이며, 기울기의 경우 유출지점을 중심으로 나누어보면 하부와 상부에서 모두 간조 이전에는 완만해지다가 이후에 급격해지는 경향성의 전환이 관측되었다. 이러한 경향성의 전환은 부피 및 층후 변화와 동일하게 유출량의 변동에 따른 결과로 해석할 수 있다.

이를 요약하면, 유출량이 비슷한 두 시기에 지하수 유출이 경사도와 고도 변화에 미친 영향은 8.29일 사리에는 뚜렷하게 나타나지만 9.19일 조금에는 유의미하게 나타나지 않았다. 이는 상술한 해석과 동일하게 두 시기의 누적 유출량의 차이에서 기인한 것으로 판단된다. 또한 조금 시기에 나타나는 간조 시점을 중심으로 한 경향성의 변화 역시 부피 및 층후 변화와 동일하게 나타났다. 이는 유출량이 최대가 되는 간조 시점을 전후로 지형변화의 경향성이 달라졌음을 암시한다.

한편 <그림 20>과 <그림 21>의 해빈 단면에서는 지하수 유출 지점을 중심으로 경사가 뚜렷하게 변화였다. 일반적으로 대조차 해빈에서 오목한 형태의 단면이 나타나는 것은 내륙 방향으로 파랑이 이동하면서 집중된 파랑 에너지를 소산시키기 위해 경사가 점차 급해지기 때문이라고 알려져 있다(김찬웅, 2012). 그러나 오목한 모양의 해빈 단면에서 경사급변점이 나타나는 것은 위의 해석만으로는 설명할 수 없다. 하지만 본 연구에 따르면 지하수 유출이 일어나는 지점을 중심으로 상부와 하부의 경사도 변화의 정도가 다르다. 따라서 지하수 유출이 곧 경사급변점을 형성하는 요인이 되거나, 혹은 최소한 경사급변점을 유지 및 강화시키는 역할을 수행하는 것으로 판단된다(Turner, 1993; Masselink and Turner, 1999).

이는 3장에서 제시한 연구지역의 입도 분포를 살펴보면 더욱 확실해진다. 연구지역의 입도 분포는 지하수 유출지점을 기준으로 바다 방향으로 입도가 상대적으로 세립해지고 분급이 좋았으며 유출 지점 상부에서는 입도가 상대적으로 조립해지고 분급이 좋지 않았다(표 6). 이는 지하수 유출지점에서 나타나는 경사급변점이 포화된 유출지점 하부

의 완경사 구역과 불포화된 유출지점 상부의 급경사구역을 나누는 퇴적물 운반의 분기점 역할을 수행한다는 것을 의미한다. 즉, 8월 29일 사리에 측량기간 내부에서 상부와 하부의 기울기 구분이 강화되는 것을 볼 때, 지하수 유출지점에서 선택적 분급작용이 발생하였다고 추정된다(Masselink and Turner, 1999). 이를 통해 지하수의 유출이 경사 급변점을 유지 및 강화하는 요인으로 기능한다고 판단할 수 있다.

Masselink(1995)에 따르면 지하수의 유출이 발생하더라도 입도가 0.3mm보다 세립해지면 경사급변점이 나타나지 않고 해빈 단면이 동질적으로 완만해진다고 주장하였다. 즉, 지하수 유출로 인한 경사의 구분은 입도가 0.3mm인 임계 입도(critical grain size)보다 조립할 때에만 발생한다는 것이다. 연구 지역의 입도는 이보다 조립하였으며, 이에 따라 경사급변점이 실제로 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

3. 지형변화의 경향성

1) 연구지역의 평형 단면 경사

연구 지역에 설정한 격자 내부는 해빈의 스워시(swash) 영역의 일부이다. 스워시는 파랑에 의해 유발되며, 해수면이 해빈면을 따라 주기적으로 상하 왕복운동을 하는 현상을 말한다(Hughes and Turner, 1999). 스워시 영역의 평형단면 경사는 조위와 지하수위의 연동과 분리에 의해 영향을 받는다. 이 때 스워시 영역의 평형단면 경사 $\tan\beta_e$ 는 해빈의 포화 여부에 따라 <식 2-12>, <식 2-13>과 같이 결정된다(Turner, 1995a). 이에 따라 도출된 연구 지역의 평형단면 경사도 $\tan\beta_e$ 와 측량한 시점의 경사도 $\tan\beta$ 를 비교하였다(표 13).

표 13. 평형 단면 경사 및 실측 경사

일시	평형단면 경사($\tan\beta_e$)		실측 경사($\tan\beta$)	
	유출지점 상부	유출지점 하부	유출지점 상부	유출지점 하부
8.29	0.322	0.036	0.138	0.020
9.5	0.344	0.038	-	-
9.19	0.363	0.041	0.150	0.015
연평균	0.243	0.036	-	-

이를 살펴보면, 정량적인 값에 있어서 실측 기울기가 유출지점 상부와 하부에서 사리에는 각각 0.138, 0.020, 조금에는 각각 0.150, 0.015로 모두 평형단면 기울기보다 완만했다. 경사 변화 경향성의 경우, 유출지점 상부의 평형경사는 측량 시점이 지남에 따라 점차 상승하는 경향을 보이며, 유출지점 하부의 평형 경사 역시 점차 상승한다. 실측 경사의 경우 유출지점 상부에서 약간 급해졌으나 유출지점 하부에서는 약간 완만해졌다. 그러나 지하수 유출만이 지형변화에 영향을 미치는 각 측량일 내의 변화만 살펴보았을 때는, 유출지점 하부에서도 점차 기울기가 급해지는 모습을 보여 평형단면 기울기의 경향성과 일치하였다(표 11-12).

이는 지하수 유출 요인이 지형변화에 미치는 영향이 평형경사의 변

화와 동일한 방향으로 일어난다는 것을 의미한다. 즉, 지하수 유출은 평형경사에 근접한 방향으로 지형변화에 영향을 미친다고 판단할 수 있다. 따라서 지하수 유출은 전반적인 지형변화의 경향성을 유지 및 강화하는 역할을 수행한다고 사료된다.

측량 시기 내에서의 평형경사 변화의 경향성은 연평균 평형경사와 차이가 커지는 것으로 나타난다. 이는 계절의 영향이 큰 것으로 보이는데, 유의파고가 겨울철에는 상대적으로 높아지고 유의파주기는 짧아짐에 따라 무차원 침강속도는 여름철에 비하여 커지게 된다. 따라서 겨울철의 평형경사는 여름철보다 완만해질 것으로 예상된다. 즉, 평형경사가 여름철에는 겨울철보다 상대적으로 급하기 때문에 평형경사의 변화가 급해지는 방향으로 나타나며, 겨울철에는 반대의 현상이 나타날 수 있을 것으로 예상된다. 하지만 지하수의 유출은 겨울철에도 동일하게 발생하며, 따라서 충분한 누적 유출량이 있을 때 지형변화에 미치는 경향성은 겨울철에도 유지될 것으로 예상할 수 있다. 이 경우 겨울철에는 지하수 유출이 평형경사에서 멀어지는 방향으로 지형을 변화시킬 것이다. 즉, 전반적인 지형변화의 경향성에서 반대되는 방향으로 지하수 유출이 작용하며, 파랑 등의 다른 요인으로 인한 지형변화가 이를 상쇄시킬 것으로 예상된다. 그러나 이에 대해서는 추가로 겨울철을 연구시기로 설정한 연구가 필요하다.

V. 결론

본 연구는 학ampo 북측 해빈을 대상으로 지하수위 변동과 지하수 유출량을 측정 및 추정하고 동일한 시기에 해빈 미지형 변화를 지상 LiDAR 장비를 이용하여 측량하였다. 이를 바탕으로 지하수 유출이 해빈 미지형 변화를 유발하였음을 확인하였으며, 그로 인한 미지형 변화의 경향성과 지하수 유출이 해빈 미지형변화에 있어서 가지는 의미를 해석하였다. 연구의 결론은 다음과 같다.

첫째, 지하수위 및 유출량이 조석 주기에 맞추어 변동하는 것을 확인하였다. 조석 주기에 따른 지하수위의 변동은 내륙 방향으로 갈수록 시간이 더욱 지연되어 나타났으며, 조위의 변동이 클수록 지하수위와 유출량의 변화율 또한 이에 비례하여 증가하였다. 또한 지하수위와 유출량의 변동은 급격히 상승하는 반면 완만하게 감소하는 현상이 나타남을 확인하였다.

둘째, 측량 시기 동안 학ampo 북측 해빈의 단면 변화와 부피 및 층후 변화를 확인하였다. 사리에는 전반적으로 침식 경향이 우세하였으며 유출지점 상부 및 하부의 기울기가 급해졌다. 또한 유출지점 상부의 변화량이 상대적으로 하부보다 많았다. 반면 조금에는 전반적으로 유의미한 변화가 나타나지 않았으나 전반적으로 유출지점 하부와 전체 경사가 급해지는 경향이 나타났다. 특히 간조 시점을 중심으로 지형변화의 경향성이 달라지는 사실을 확인하였다. 이는 사리에 더 많은 누적 유출량이 발생하였으며, 유출량이 간조 시점에 최대값을 보였기 때문이라고 판단된다.

셋째, 지하수 유출이라는 요인이 해빈의 침식에 탁월한 영향을 미쳤음을 확인하였다. 또한 지하수 유출이 경사급변점을 유지 및 강화시키는 하나의 요인이 될 수 있는 가능성을 확인하였다. 이에 따라 경사급변점의 상부와 하부에 다른 경향의 지형 변화가 일어나며, 지하수 유출이라는 요인이 이러한 변화의 경향을 강화시킨다고 판단된다. 이를 바탕으로 지하수 유출이라는 매커니즘이 해빈의 유형 분류나 해빈 지형의 형성에 중요한 역할을 수행할 수 있을 것으로 사료된다.

해빈의 지형변화에 영향을 미치는 다양한 요인들과는 다르게 지하수 유출이라는 요인이 지금까지 해빈 미지형 변화에 어떠한 영향을 미치는지는 주요하게 다루어지지 않았다. 이 연구는 단기적으로 나타나는 해빈의 미지형 변화에 초점을 맞추어 지하수 유출이라는 요인이 해빈 미지형변화에 미치는 영향을 고찰하였다. 이는 지금까지 간과되었던 해빈 지형변화의 매커니즘을 규명함으로써 해빈 지형변화의 보다 완전한 이해에 도움을 줄 수 있을 것으로 사료된다. 게다가 해빈에 국한되지 않고 지하수위의 변동이라는 요인이 해빈-사구로 이어지는 해안 지형 전체에 어떠한 영향을 미치는지도 살펴볼 수 있었다. 뿐만 아니라 지하수 유출 억제를 통해 최근 심각해지는 해빈 침식 문제를 방지하고자 하는 일련의 대책에 대한 실마리를 제공할 수 있었다. 하지만 본 연구에서 다룬 측량 시점과 자료만으로는 지하수 유출이 해빈 지형변화에 미치는 매커니즘을 완전하게 밝히기는 힘들다. 따라서 이 연구를 토대로 보다 장기적이고 해상도가 높은 자료가 구축된다면 해빈 지형변화를 깊이 있게 이해할 수 있을 것으로 판단된다.

| 참고문헌 |

- Ataie-Ashtiani, B., Volker, R.E. and Lockington, D.A., 2001, Tidal effects on groundwater dynamics in unconfined aquifers, *Hydrological Processes*, 15, 655-699.
- Baird, A.J. and Horn, D.P., 1996, Monitoring and modelling groundwater behaviour in sandy beaches, *Journal of Coastal Research*, 12(3), 630-640.
- Bakhtyar, R., Barry, D.A., Li, L., Jeng, D.S. and Yeganeh-Bakhtiary, A., 2009, Modeling sediment transport in the swash zone: A review, *Ocean Engineering*, 36, 767-783.
- Blott, S.J. and Pye, K., 2001, GRADISTAT: A grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments, *Earth Surf. Proc. Landforms*, 26, 1237-1248.
- Brown, A.C. and McLachlan, A., 2002, Sandy shore ecosystems and the threats facing them: some predictions for the year 2025, *Environmental Conservation*, 29, 62-77.
- Burnett, W.C. and Dulaiova, H., 2003, Estimating the dynamics of groundwater input into the coastal zone via continuous radon-222 measurements, *Journal of Environmental Radioactivity*, 69, 21-35.
- Butt, T., Russel, P. and Turner, I.L., 2001, The influence of swash infiltration-exfiltration on beach face sediment transport: onshore or offshore?, *Coastal Engineering*, 42(1), 35-52.
- Cable, J.E., Burnett, W.C., Chanton, J.P., Corbett, D.R. and Cable, P.H., 1997, Field evaluation of seepage meters in the coastal marine environment, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 45(3), 367-375.
- Clarke, D.J. and Eliot, I.G., 1987, Groundwater-level changes in a coastal dune, sea-level fluctuations and shoreline movement

- on a sandy beach, *Marine Geology*, 77, 319-326.
- Cornelis, W.M. and Gabriels, D., 2003, The effect of surface moisture on the entrainment of dune sand by wind: an evaluation of selected models, *Sedimentology*, 50(4), 771-790.
- Fetter, C.W., 2001, ***Applied Hydrogeology***, 4th ed., Prentice Hall: NJ.
- Fredlund, D.G. and Houston, S.L., 2013, Interpretation of soil-water characteristic curves when volume change occurs as soil suction is changed, *Advances unsaturated soils*, CRC Press, Boca Raton, FL, 15-31.
- Goldberg, E.D., 1994, Coastal zone space: prelude to conflict?, UNESCO, Paris.
- Horn, D.P., 2002, Beach groundwater dynamics, *Geomorphology*, 48, 121-146.
- Horn, D.P., 2006, Measurements and modelling of beach groundwater flow in the swash zone: a review, *Continental Shelf Research*, 26, 622-652.
- Hughes, M. and Turner, I.L., 1999, The beachface, In Short, A.D. (ed.), ***Handbook of beach and shoreface morphodynamics***, John Wiley & Sons, pp.119-144.
- Komar, P.D. and Gaughan, M.K., 1972, Airy wave theory and breaker height prediction, *Proceedings of the 13th Conference on Coastal Engineering*, 405-418.
- Lewis, J.P., 1995, Fast normalized cross-correlation, *Vision interface*, 10(1), 120-123.
- Masselink, G. and Short, A.D., 1993, The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology: A conceptual beach model, *Journal of Coastal Research*, 9(3), 785-800.
- Masselink, G., 1995, *Morphodynamics of macrotidal beaches: Examples from Central Queensland, Australia*, Doctoral dissertation, University of Sydney.

- Masselink, G. and Turner, I.L., 1999, The effect of tides on beach morphodynamics, In Short, A.D. (ed.), ***Handbook of beach and shoreface morphodynamics***, John Wiley & Sons, pp.204-229.
- Mitchell, A.R., 1991, Soil surface shrinkage to estimate profile soil water, *Irrigation Science*, 12(1), 1-6.
- Nielsen, P., 1990, Tidal dynamics of the water table in beaches, *Water Resources Research*, 26(9), 2127-2134.
- Nielsen, P., 1997, Coastal groundwater dynamics, *Coastal dynamics'97*, ASCE, 546-555.
- Owoputi, L.O. and Stolte, W.J., 2001, The role of seepage in erodibility, *Hydrological processes*, 15(1), 13-22.
- Packham, J.R. and Willis, A.J., 1997, ***Ecology of dunes, salt marsh and shingle***, Chapman and Hall, London.
- Pietro, L.S., O'Neal, M.A. and Puleo, J.A., 2008, Developing terrestrial-LIDAR-based digital elevation models for monitoring beach nourishment performance, *Journal of Coastal Research*, 1555-1564.
- Saye, S.E., Van der Wal, D., Pye, K. and Blott, S.J., 2005, Beach-dune morphological relationships and erosion/accretion: an investigation at five sites in England and Wales using LIDAR data, *Geomorphology*, 72(1), 128-155.
- Shepard, F.P., 1950, Beach cycles in southern california, US Army Corps of Engineers, Beach Erosion Board, *Technical Meomorandum No.15*, pp.31.
- Short, A.D., 1999, Wave-dominated beaches, In Short, A.D. (ed.), ***Handbook of beach and shoreface morphodynamics***, John Wiley & Sons, pp.173-203.
- Small, C. and Nicholls, R.J., 2003, A global analysis of human settlement in coastal zones, *Journal of Coastal Research*, 584-599.
- Taniguchi, M., Burnett, W.C., Dulaiova, H., Kontar, E.A., Povinec, P.P.

- and Moore, W.S., 2006, Submarine groundwater discharge measured by seepage meters in sicilian coastal waters, *Continental Shelf Research*, 26, 835-842.
- Turner, I.L., 1993, Water table outcropping on macro-tidal beaches: a simulation model, *Marine Geology*, 115(3), 227-238.
- Turner, I.L., 1995a, Simulating the influence of groundwater seepage on sediment transported by the sweep of the swash zone across macro-tidal beaches, *Marine Geology*, 125(1), 153-174.
- Turner, I.L., 1995b, Modelling the time-varying extent of groundwater seepage on tidal beaches, *Earth Surface Processes and Landforms*, 20(9), 833-843.
- Turner, I.L. and Leatherman, S.P., 1997, Beach dewatering as a 'Soft' engineering solution to coastal erosion: A history and critical review, *Journal of Coastal Research*, 13(4), 1050-1063.
- Turner, I.L. and Masselink, G., 1998, Swash infiltration-exfiltration and sediment transport, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 103(C13), 30813-30824.
- Yang, B., Madden, M., Kim, J. and Jordan, T.R., 2012, Geospatial analysis of barrier island beach availability to tourists, *Tourism Management*, 33(4), 840-854.
- 국토해양부, 2008, 연안침식 모니터링 체계구축(V).
- 김용호, 2006, 지하수해안유출량의 권역별평가 및 변화특성분석, *한국환경과학회 학술발표회 발표논문집*, 15(1), 180-182.
- 김찬웅, 2012, 해빈의 단면 변화에 관한 연구: 백사장 해수욕장을 사례로, 서울대학교 석사학위논문.
- 김찬웅·신영호·유근배, 2015, 겨울철 서해안 사취형 해빈의 지형과 퇴적물 특성의 변화 - 안면도 백사장 해빈을 중심으로, *국토지리학회지*, 49(1), 117-131.
- 류호상, 2010, 세포자동자 기반 수치모형을 이용한 해빈-사구 단면의 중규모 지형변화 탐구 - 모의실험과 사례를 중심으로 -, 서울대학교 박사학위논문.

- 박정재, 2009, 해수면 상승 및 해일로 인한 자연재해와 대응 방안, *국토지리학회지*, 43(3), 435-454.
- 소광석·양우현·권이균, 2009, 고창군 명사십리 조간대 표층 퇴적물의 계절변화, *한국해양학회지*, 14, 181-188.
- 선우중호, 2006, 「수문학」, 개정판, 동명사.
- 심재설·김진아·박한산·김선정, 2010, 지상 LiDAR를 이용한 만리포 해변 정밀 지형측량 및 지형 변화 분석, *Ocean and Polar Research*, 32(1), 73-84.
- 양정석·조흥연·정신탐·김상준, 2004, 마산만 유역의 지하수 유출량 추정, *한국해안해양공학회 논문집*, 16(4), 213-223.
- 유근배·신영호·김대현·김성환, 2013, 「생태서식처로서 한국 서해안 해안사구」, 서울대학교출판부, 153pp.
- 윤순옥·전청균·황상일, 2013, 지상라이다의 고해상도 DEM을 이용한 울진 진북리 사빈 변화 분석, *대한지리학회지*, 48(3), 321-335.
- 윤용안, 2003, 한국 서해안 삼봉해빈의 단면 변화와 퇴적물 특성에 관한 연구, 공주대학교 석사학위논문.
- 이원영·성효현, 2013, 혼합해빈의 퇴적물 분포 특성과 미지형 경관변화 - 태안 해안국립공원 파도리 해빈을 중심으로, *한국지형학회지*, 20(4), 1-13.
- 장진호·김여상·조영길, 1999, 해안침식이 우세한 반폐쇄적 조간대의 퇴적작용: 한국 서해안의 함평만, *한국해양학회지*, 4(2), 117-126.
- 추용식·권수재·박장준·박용안, 1996, 한국 서해중부 해빈에서의 퇴적작용의 계절변화, *해양연구*, 18(1), 37-45.
- Haslett, S.K., 김성환·손명원 옮김, 2010, 「해안 시스템」, 푸른길, 276pp.
- 화이트, I.D., 모터세드, D.N., 해리슨, S.J., 손명원 옮김, 2012, 「환경 시스템 그리고 자연지리학」, 푸른길, 631pp.

<Abstract>

The influence of groundwater seepage to landform of the beach in micro-scale

- in case of Hakampo beach, Korea -

Jinsu, Bae
Department of Geography
The Graduate School
Seoul National University

There is growing attention for beach, in particular for coastal erosion as a result of climate change. Thus, a lot of researches discussed factors such as wave or tide that affect change of beach land-form have been conducted by many researchers. However, little interest has been paid to groundwater seepage that affects change of beach land-form.

The purpose of this study is to investigate the temporal and spatial change of beach land-form in micro-scale and find the role of the groundwater seepage that affects this phenomenon. This study includes two steps to achieve its objective. First, this study measures the groundwater level and estimates the groundwater seepage in order to find the relationship between groundwater level oscillation and the factor that affects this oscillation. Second, this study surveys the micro-change of the beach by using terrestrial LiDAR during observation period. The study area is Hakampo beach, west coast of South Korea.

The results of this study are summarized as follows:

First, groundwater level and groundwater seepage are fluctuated according to tide level oscillation. As far from coastal line, time lag of groundwater level fluctuation is more dragging on. In addition, groundwater level fluctuation is directly correlated to the rate of the tide level change. This study also figures out the hysteresis phenomenon of groundwater level change and groundwater seepage.

Second, erosion process is dominant in the beach during spring tide. At the time of spring tide, upper and lower beach slope of seepage point is steeper. On the other hand, at the time of neap tide, there is no meaningful change of the beach. However, there is switch of direction of beach landform change when the tide level is lowest. First, This is because much more groundwater seepage in spring tide than in neap tide. Second, the amount of groundwater seepage shows maximum value when the tide level is lowest.

Finally, this study find that groundwater seepage has superior influence to the erosion of beach. Futhermore, groundwater seepage strengthens or maintains the knick point. Consequently, there is a difference of change between upper part of the beach and lower part of the beach, and this phenomenon is strengthened by groundwater seepage. This implies that groundwater seepage might be the main key of the beach classification or formation of beach landform.

Keywords : Groundwater level, groundwater seepage,
beach micro-landform, LiDAR

Student Number : 2014-20249